

生态友好的中国可再生能源发展空间布局 (2016-2030)

——“保护”与“发展”兼顾的系统规划方法在中国集中式风能 / 光伏发展布局中的应用



生态友好的中国可再生能源发展空间布局（2016–2030）

——“保护”与“发展”兼顾的系统规划方法在中国集中式风能/光伏发展布局中的应用

目录

执行摘要.....	1
1.我国可再生能源与生态保护现状与挑战.....	2
1.1 可再生能源发展.....	2
1.1.1 资源分布.....	2
1.1.2 发展现状.....	5
1.1.3 潜在的负面生态影响.....	7
1.2 生态保护.....	8
1.3 生态友好的发展规划和政策.....	9
1.3.1 相关规划.....	9
1.3.2 相关政策、法规和标准.....	12
1.4 生态友好的可再生能源发展面临的主要挑战.....	17
1.5 可再生能源宏观选址相关研究.....	17
1.5.1 国内研究现状.....	18
1.5.2 国外研究现状.....	19
1.5.3 国内外当前研究的特点.....	19
2.研究目标和内容.....	21
2.1 本研究的意义和必要性.....	21
2.2 研究目标和内容.....	22
2.3 发展系统规划方法概述.....	22
3.研究方法 with 数据.....	25
3.1 集中式风能/光伏发展布局评估技术方法.....	25
3.2 高生态保护价值区域的识别.....	26
3.2.1 当前高生态保护价值区域的识别.....	27
3.2.2 近中期高生态保护价值区域的识别.....	29
3.3 近中期集中式风能/光伏技术可开发区域的识别.....	30
3.3.1 近中期集中式风能技术可开发区域的识别.....	30
3.3.2 近中期集中式光伏技术可开发区域的识别.....	32
4.生态友好的可再生能源（集中式风能/光伏发电）潜在发展空间布局.....	35
4.1 基于生态保护价值的发展区划.....	35
4.1.1 当前及近中期高生态保护价值区域.....	35

4.1.2 基于生态保护价值的发展区划	36
4.2 现有可再生能源项目生态平衡性评估.....	37
4.2.1 现有集中式风能项目生态平衡性评估.....	37
4.2.2 现有集中式光伏项目生态平衡性评估.....	40
4.3 近中期集中式风能/光伏发电技术可开发资源.....	42
4.4 近中期生态友好的集中式风能/光伏发电发展空间布局.....	43
4.4.1 近中期生态友好的集中式风能发展空间布局.....	43
4.4.2 近中期生态友好的集中式光伏发电发展空间布局.....	48
5.结果讨论与政策建议	51
5.1 主要结论	51
5.2 政策建议	52
附录 A 2030 年高比例可再生能源情景.....	54
2030 年风能发展情景	54
2030 年太阳能发展情景	55
附表 B 数据清单	57
附表 C 集中式光伏/风能发电项目技术可开发区域标准.....	58
附表 D 区域发展类型	59

执行摘要

可再生能源发展和生态环境质量改善是近年来中国经济社会发展过程中的两大热点问题，根据国际经验，可再生能源发展与生态环境保护之间存在潜在的冲突。因此，做好“保护与发展兼顾”的系统规划，对可再生能源的绿色、可持续开发至关重要。为此，2017年，大自然保护协会(The Nature Conservancy, TNC)与国家发展改革委能源研究所(Energy Research Institute, ERI)共同启动了“生态友好的可再生能源发展规划研究项目”。

研究运用发展系统规划方法(Development by Design, DbD)，将省级主体功能区划、高生态保护价值区域与国家可再生能源¹(集中式风能发电和集中式光伏发电)技术可开发区域进行叠加分析，进而提出近中期生态友好的集中式风能/光伏发电发展空间布局和发展建议。

本项目研究发现，截止2015年，现有的中国集中式风能/光伏项目与生态保护之间的平衡性较好，71%的集中式风能项目和85%的集中式光伏项目位于低风险发展区的范围之内，但华北、西北和东北地区的部分项目建设在了应该规避建设的国家级自然保护区以及高生态保护价值区域。在近中期，对标2030年高比例可再生能源发展情景下的集中式风能/光伏发电装机容量规划，本研究发现低风险发展区就已经足够支撑未来的发展规划。因此，在未来集中式风能/光伏项目规划时，更应注意规避高风险发展区，并生态友好的利用低风险发展区。

基于研究，我们提出如下七点政策建议：

- 1) 加强能源规划管理部门与生态环境管理部门的跨部门协作。
- 2) 深入开展可再生能源开发布局与生态保护之间协调性规划研究工作。
- 3) 进一步加强项目事前审核及环评管理。
- 4) 推进省级主体功能区划中的限制开发区在空间布局上的细化与落实。
- 5) 加快研究并推动实施可落地的生态修复和生态补偿机制，平衡区域经济发展。
- 6) 推进国家公共数据公开化。
- 7) 统筹考虑与我国接壤国家和地区的资源。

¹ 本研究的可再生能源仅指陆上及沿海滩涂地区的集中式风能发电和集中式光伏发电项目，暂不涉及水电，也未考虑海上风电。

1. 我国可再生能源与生态保护现状与挑战

1.1 可再生能源发展

十八大以来，党中央、国务院对绿色发展做出全面部署，提出了“创新、协调、绿色、开放、共享”五大发展理念。十九大提出了建设美丽中国的战略构想，推进绿色低碳发展和加强生态环境保护已成为生态文明建设的核心任务。中共中央政治局第三次集体学习，习近平总书记提出“要建设资源节约、环境友好的绿色发展体系”，并将其作为现代化经济体系的七个组成部分之一。因此兼顾能源优化与生态环境友好的绿色发展已经成为国家发展的重要战略，是构建高质量现代化经济体系的必然要求。同时，中国在《巴黎协定》框架下提交的国家自主减排贡献方案中，明确提出要将可再生能源比例在 2030 年提升至 20%，这一具有挑战性的目标将进一步推动我国加快可再生能源发展。

2012 年以来，我国风能、光伏发电装机实现了飞速增长，截至 2018 年底，中国风能发电累计并网装机容量达到 1.84 亿千瓦；我国光伏发电累计装机容量 1.74 亿千瓦，成为全球光伏发电装机容量最大的国家；风能和光伏发电技术的进步，使其技术成本更具竞争优势，也为我国可再生能源大规模发展奠定了基础。按照现有发展规模以及发展速度，在可以预见的未来，中国的可再生能源行业将会蓬勃发展，大规模的可再生能源发电工程建设也会陆续开展，特别是集中式风能发电和集中式太阳能光伏发电。

1.1.1 资源分布

2008 年，在全国风能资源普查的基础上，国家气象局牵头开展了“全国风能详查和评估”项目。结果显示，在年平均风功率密度达到 300 瓦/平方米的风能资源覆盖区内，考虑自然地理条件和生态环境保护政策等制约因素，并剔除装机容量小于 1.5 兆瓦/平方米的区域后，中国陆地 0 米、70 米、100 米高度层的风能资源技术可开发容量分别为 20 亿、26 亿和 34 亿千瓦，陆上风能资源分布区主要集中于东北、内蒙、华北北部、甘肃酒泉、新疆北部、云贵高原和东南沿海。

2018 年，国家气象局风能太阳能资源中心发布《2017 年中国风能太阳能年资源年景公报》，其中对风能资源的评估结果显示，2017 年全国 70 米高度层年平均风速为 5.5 米/秒，大于 6.0 米/秒的地区主要分布在东北大部、华北北部、内蒙古大部、宁夏、陕西北部、甘肃大部、新疆东部和北部的部分地区、青藏高原大部、四川西部以及云贵高原和广西等地的山区，其中，内蒙古中部和东部、新疆北部和东部部分地区、甘肃西部、青藏高原大部等地年平均风速达到 7.0 米/秒，部分地区甚至达到 8.0 米/秒以上。东部沿海大部分地区、山东大部、华东、华南、华中及西南等部分山区的平均风速也达到 5.0 米/秒以上（见图 1.1）。

2017 年全国陆地 70 米高度层年平均风功率密度为 233.9 瓦/平方米，高值区主要分布在三北地区、东部沿海地区，以及青藏高原、云贵高原和华南山脊地区。年平均风功率密度超过 300 瓦/平方米的区域主要分布在三北地区、青藏高原和云南的山脊地区，年平均风功

率密度超过 200 瓦/平方米的区域分布较广，华东和沿海及中部地区的山地区域的风功率密度一般都能达到 200 瓦/平方米（见图 1.2）。

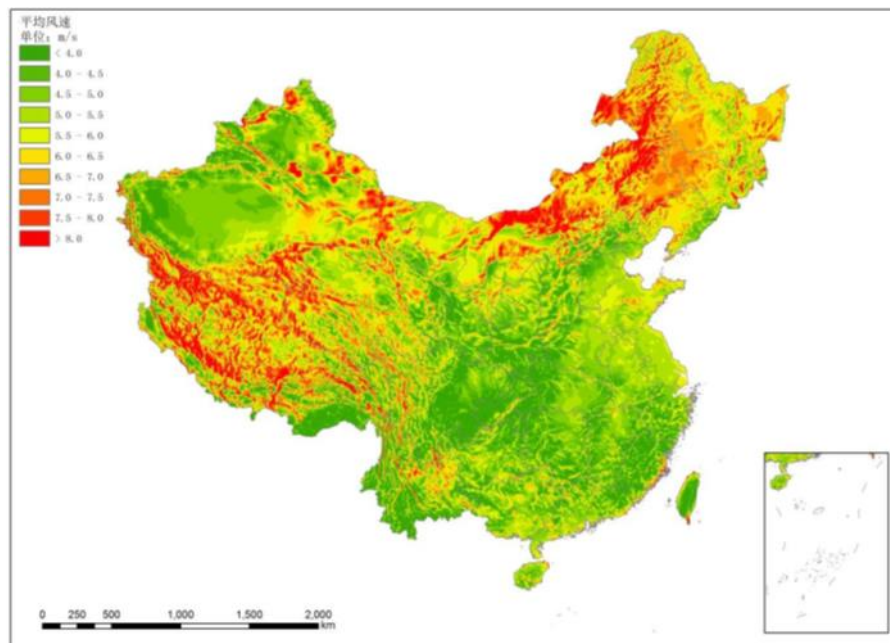


图 1.1 2017 年全国陆地 70m 高度层年平均风速分布（国家气候中心）

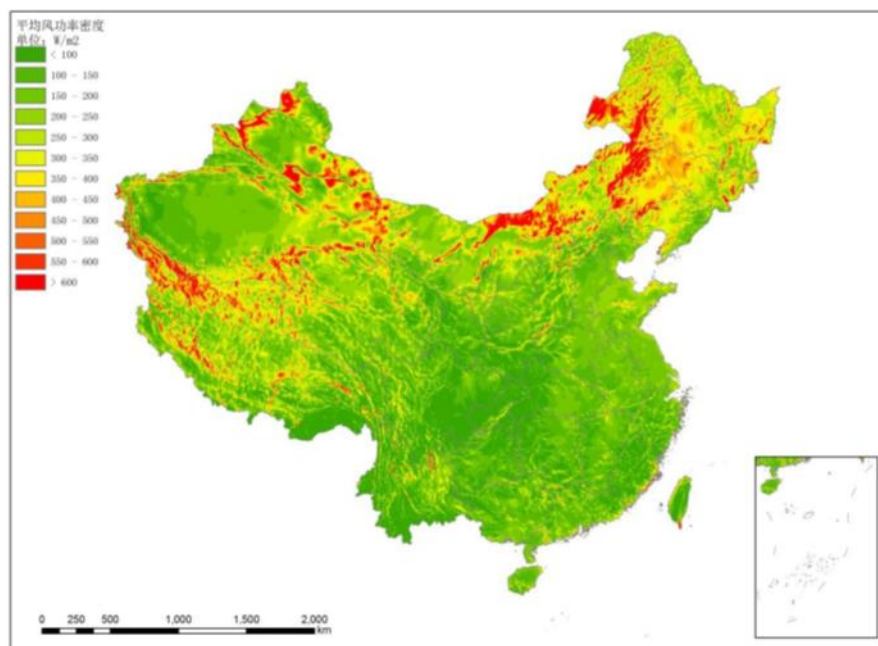


图 1.2 2017 年全国陆地 70m 高度层年平均风功率密度（国家气候中心）

2014 年，中国可再生能源学会光伏专业委员会发布全国太阳能资源及分布情况，中国太阳能总辐射资源丰富，总体呈“高原大于平原，西部干旱半干旱区大于东部湿润区”的分布特点。其中，青藏高原最为丰富，年总辐射量超过 1800 千瓦时/平方米，部分地区甚至超过 2000 千瓦时/平方米。

2018 年，中国气象局风能太阳能资源中心发布《2017 年中国风能太阳能年资源年景公

报》，其中对太阳能资源评估结果显示：

对于水平面太阳能资源，2017年，东北西部、华北北部、西北和西南大部年水平面总辐射量超过1400千瓦时/平方米，其中，新疆东部、西藏中西部、青海大部、甘肃西部、内蒙古西部太阳能资源最为丰富，年水平面总辐射量超过1750千瓦时/平方米。新疆大部、内蒙古大部、甘肃中东部、宁夏、晋陕冀北部、青海东部和南部、西藏东部、四川西部、云南大部及海南等地太阳能资源也很丰富，年水平面总辐射量在1400-1750千瓦时/平方米之间，东北大部、华北南部、黄淮、江淮、江汉、江南及华南大部年水平面总辐射量在1050-1400千瓦时/平方米之间，太阳能资源相对丰富。全国太阳能资源总体上呈现高原、少雨干旱地区大，平原、多雨高湿地区小的特征（图1.3）。

对于固定式光伏发电太阳能资源²，2017年东北、华北、西北和西南大部最佳倾面年总辐射量超过1400千瓦时/平方米，首年利用小时数在1200小时以上。其中，新疆东南部、青藏高原、甘肃西部、内蒙古、四川西部等地的最佳倾面年总辐射量超过1800千瓦时/平方米，首年利用小时数在1500小时以上，局部超过1800小时。陕西南部、河南、安徽、江苏、四川东部、湖北大部、江西、湖南大部、浙江、福建、台湾、广东、福建、广西中南部、贵州西南部等地的最佳倾面年总辐射量在1000-1400千瓦时/平方米之间(图1.4)。

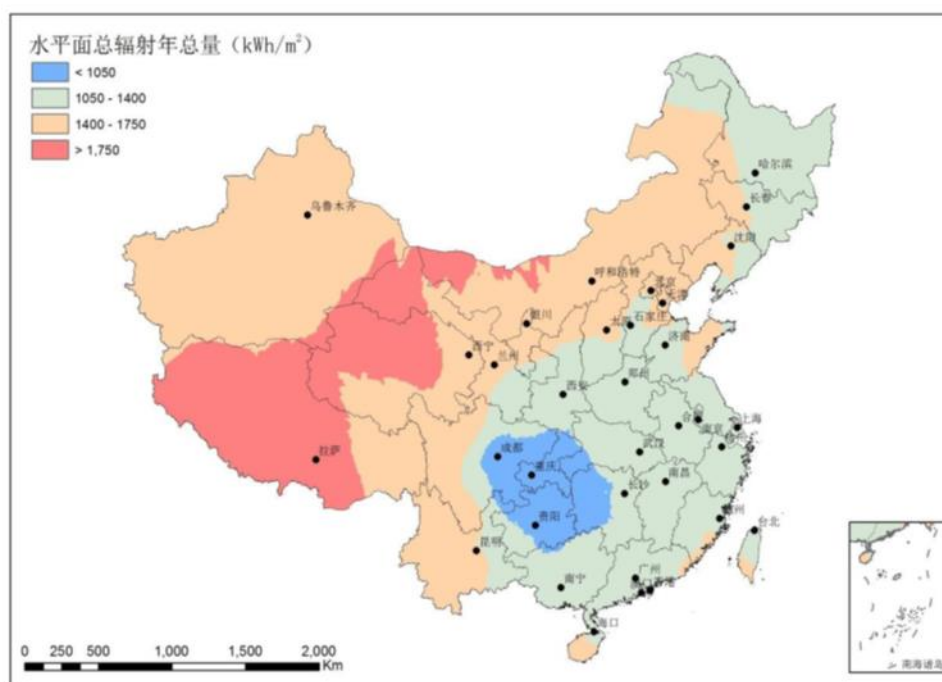


图 1.3 2016 年全国水平面总辐射量分布(国家气候中心)

²固定式光伏发电可利用太阳能资源是光复组件按最佳倾角放置时，能够接收的太阳总辐射量。

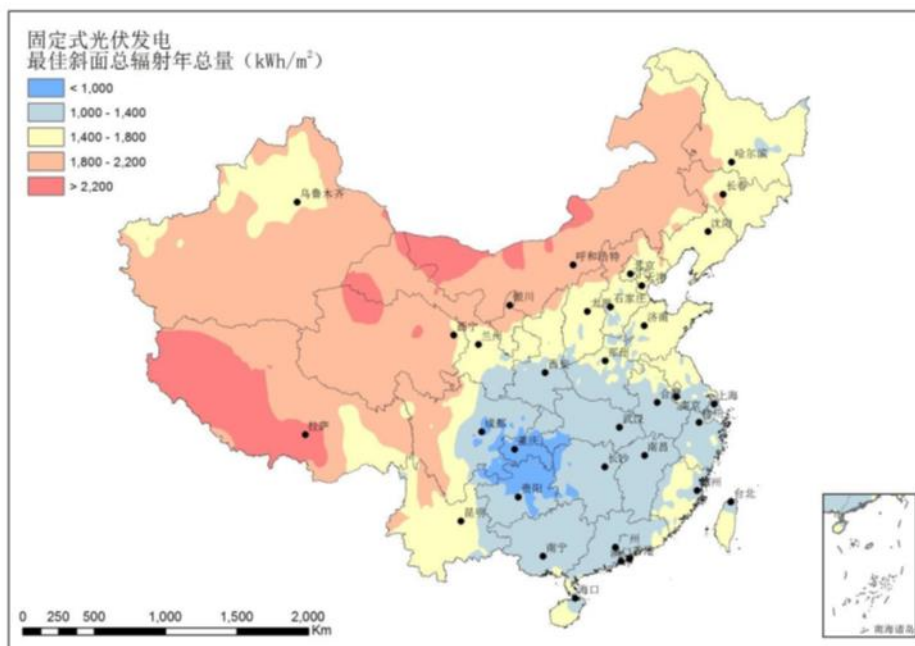


图 1.4 2017 年全国固定式光伏发电年最佳斜面总辐射量分布（国家气候中心）

1.1.2 发展现状

2017 年中国风能、太阳能继续保持快速发展势头，发电装机清洁化趋势更加明显。截至 2017 年底，全国非化石能源发电装机容量达到 6.9 亿千瓦，占总发电装机容量的比重为 38.7%，同比提高 2.1%。其中，风电并网装机容量 1.64 亿千瓦，太阳能发电并网装机容量 1.3 亿千瓦（其中，分布式光伏 2966 万千瓦），分别同比增长 10.1%和 69%。2017 年新增非化石能源发电装机 8988 万千瓦，创历年新高，其中，新增并网风电装机 1952 万千瓦，东、中部地区占 58.9%，同比提高 8.8%；新增并网太阳能发电装机 5338 万千瓦，同比增加 2167 万千瓦，82.4%的新增装机集中在东、中部地区，同比提高 19.6%。

风能、太阳能发电量增长迅速。2017 年全国全口径发电量 6.42 万亿千瓦时、同比增长 6.5%；其中，非化石能源发电量同比增长 10.0%，占总发电量比重为 30.4%，同比提高 1%。风电发电量 3057 亿千瓦时，同比增长 28%；光伏发电量达到 1182 亿千瓦时，同比增长 79%，其中集中式光伏 1026 亿千瓦时，同比增长 65%，分布式光伏 156 亿千瓦时，同比增长 1.8 倍。

风电新增装机布局继续向中东部和南方转移，“三北”地区新增装机并网 724 万千瓦，同比下降 30%。光伏发电新增装机也呈现东升西降，东中西部平衡发展的格局，西北地区新增装机 622 万千瓦，同比下降 38%，华东地区新增装机 1467 万千瓦，同比增长 167%，华中地区新增装机 1064 万千瓦，同比增长 70%。光伏装机结构进一步优化，分布式光伏装机比重提高至 23%，同比增加 10%。

我国主要省份风电装机现状（图 1.5）显示，我国风电资源潜力较大的省份中，内蒙、新疆、甘肃、宁夏等西北和北部主要资源省份风电资源开发力度较大，黑龙江、吉林等东

北地区风电资源开发力度明显不足，而位于主要电力消费区的河北、山东、江苏等省份，近两年因未受风电投资监测预警影响而发展迅速，资源潜力也得到较好发挥。资源地与消费地脱节，内蒙、新疆、甘肃等主要资源省份弃风问题仍较为突出。

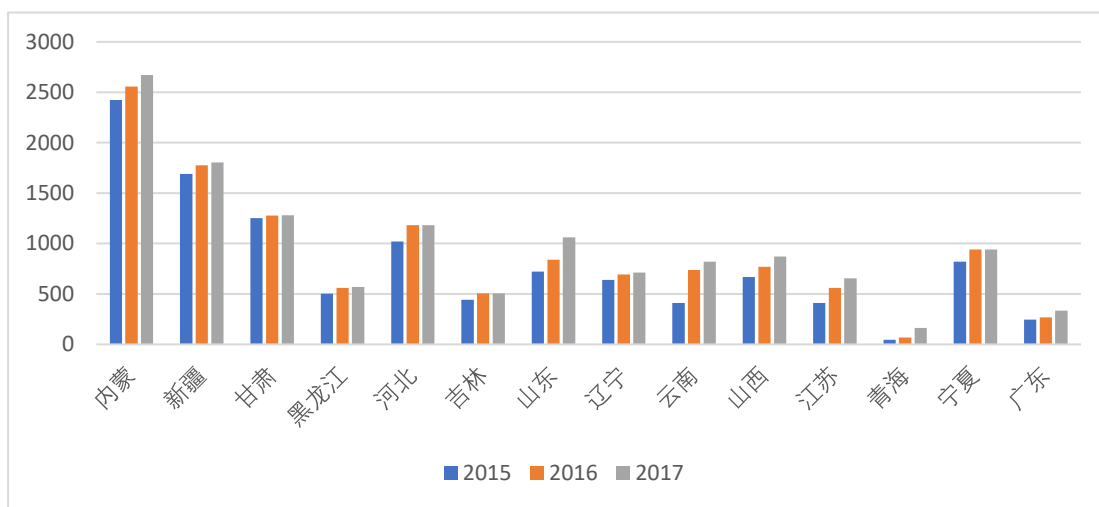


图 1.5 主要省份风电装机现状（万千瓦）

我国主要省份集中式光伏发电装机现状（图 1.6）显示，新疆、内蒙、青海、甘肃等西北和北部主要资源省份风电资源开发力度较大，西藏、四川、云南等西南地区资源富集省份及东北的黑龙江省，开发力度明显不足，位于主要电力消费区的河北、山东、江苏等省份，不仅开发力度较大，而且装机容量增长迅速。同样位于主要电力消费区的广东、广西、湖南等省份则仍处于起步阶段。新疆、内蒙、青海、甘肃等主要资源省份弃光问题仍较为突出。

我国主要省份分布式光伏发电装机现状（图 1.7）显示，因资源与消费地重合度高，山东、江苏、浙江、安徽等华东地区省份，不仅装机占比最高，增长也最为迅速。河南、河北、湖南、湖北等中部省份发展速度也相对较快，四川因资源和消费区域东西分离，开发速度相对较慢。分布式光伏基本不存在弃光问题。

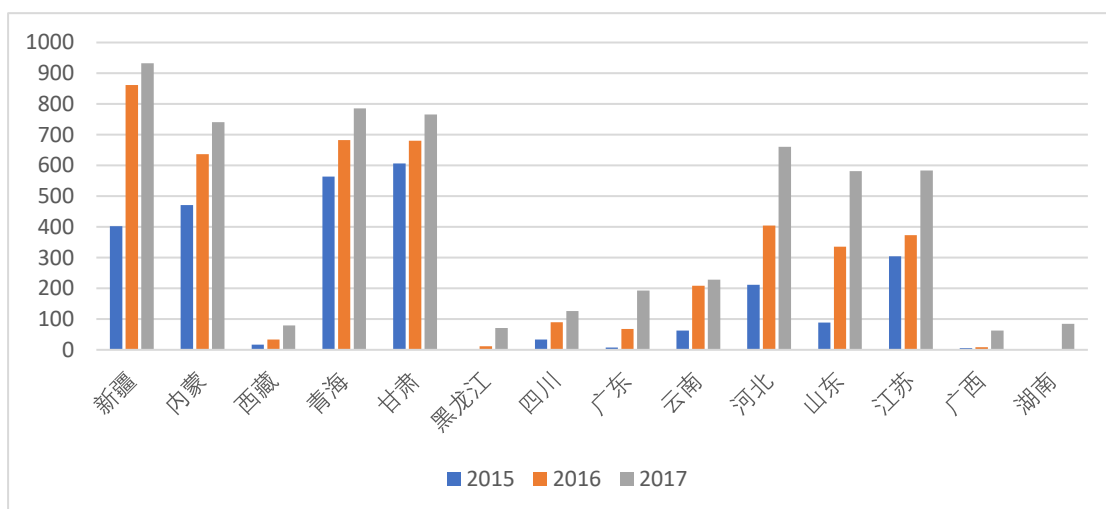


图 1.6 主要省份集中式光伏装机现状（万千瓦）

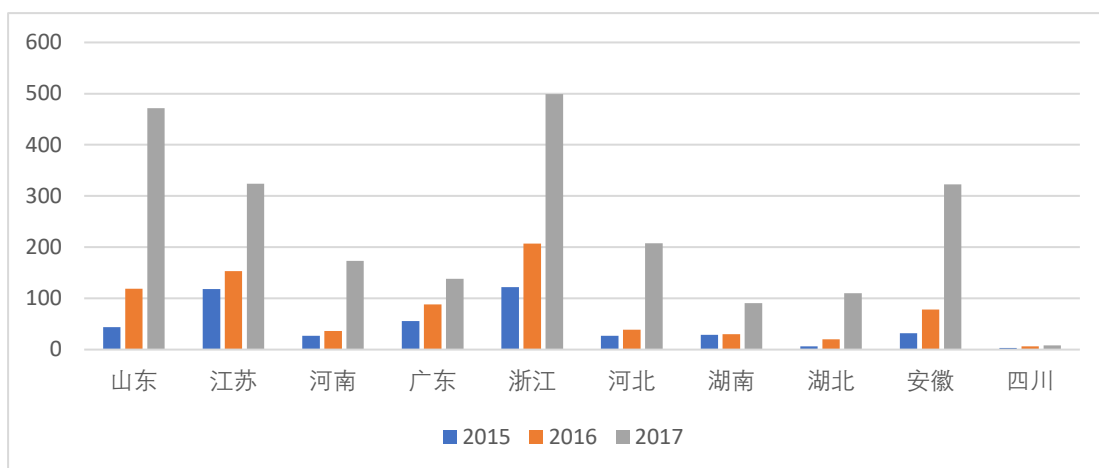


图 1.7 分布式光伏装机现状（万千瓦）

2018 年风电、光伏发电将继续保持快速增长势头。预计 2018 年将新增装机容量 1.2 亿千瓦左右，其中，非化石能源发电装机 7000 万千瓦左右。至 2018 年底，全国发电装机容量将达到 19.0 亿千瓦，其中非化石能源发电 7.6 亿千瓦、占总装机比重将上升至 40% 左右。2018-2019 年海上风电技术将进入规模化发展阶段，风电智能化趋势也将更为明显。风电发展过程中弃风限电等体制机制改革、可再生能源电力补贴及时发放、风电行业面临环保压力等问题仍将继续存在。分布式光伏在 2017 年爆发式增长基础上有望再获更大发展，大型光伏电站建设也将继续稳步推进，弃光严重的新疆、甘肃、内蒙等地的大型光伏电站将继续处于存量消化阶段，华北、华东地区将继续领跑。

1.1.3 潜在的负面生态影响

一些可再生能源资源丰富的地区，不仅是我国主体功能区划中限制开发和禁止开发的区域，也是生态保护的重点区域，这些地区都具有重要的且不可替代的生态保护价值，例如生物多样性保护价值、水土涵养保护价值以及防风固沙生态功能价值等。已有研究表明集中式风能/光伏发电项目的建设和运营会对局地气候³以及局部生态功能和物种多样性⁴造成潜在的负面影响，考虑到风能和光伏发电有 20~30 年的运营周期，如果建设规划选址不当，可能会在较长时期内对生态环境以及生态功能持续带来具有“锁定效应”的负面影响。

³ Miller L M, Keith D W. Observation-based solar and wind power capacity factors and power densities[J]. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(10): 104008; 崔杨, 陈正洪. 光伏电站对局地气候的影响研究进展[J]. *气候变化研究进展*, 2018, 14(6).

⁴ Hernandez RR, et al. (2014) Environmental impacts of utility-scale solar energy. *Renew Sustain Energy Rev* 29:766–779; Allison TD, Root TL, Frumhoff PC (2014) Thinking globally and siting locally—renewable energy and biodiversity in a rapidly warming world. *Clim Change* 126:1–6; Lovich JE, Ennen JR (2011) Wildlife conservation and solar energy development in the Desert Southwest, United States. *Bioscience* 61(12):982–992; Northrup JM, Wittemyer G (2013) Characterising the impacts of emerging energy development on wildlife, with an eye towards mitigation. *Ecol Lett* 16(1):112–125.

此外，集中式风能/光伏项目的开发需要大量土地⁵，大规模的开发可能会带来野生动植物栖息地丧失、生境破碎化和适宜性下降等负面影响。目前，中国已经出现了一些风电建设与生态环境保护冲突的事件，例如山东长岛自然保护区以及湖北黄冈龙感湖自然保护区内有违规建设的风机、广东云飞嶂风电项目和江西修水水电公司项目被指造成水土流失并对周围村民的生活造成影响等。在日益严苛的生态和环境保护要求下，中国近几年也出台了若干环保政策以保证可再生能源发展与生态友好并行（见 2.2 节）。因此，针对可再生能源发展潜在的负面生态影响，要避免走“先污染后治理，先破坏后保护”的老路，在规划和选址阶段协调可再生能源发展与生态保护变得十分重要。

1.2 生态保护

过去 30 多年里，中国经济规模扩大了数十倍，但付出了极大的生态和环境代价。尽管我国政府采取强有力的措施以缓解和避免生态环境的恶化趋势，但仍然面临十分严重的生态破坏和环境污染问题。主要表现在：（1）大气污染、水污染严重；（2）二氧化碳等温室气体排放高居全球首位；（3）生态系统退化；（4）水土流失、荒漠化严重；（5）栖息地环境改变、生境破碎化导致濒危物种增加；（6）新兴污染源产生的环境问题（转基因生物安全、汽车噪声污染、核能核电污染、新化学物质环境风险等）愈发严重；（7）突发性的严重污染事件发生频繁。化石能源开采和低效使用以及高耗能、高污染产业是导致生态环境问题的主要原因。

我国生态环境建设和状况滞后于经济社会发展，成为全面建成小康社会的最短短板和瓶颈。为改变这一趋势，近年来我国政府采取了一系列旨在促进环境与社会经济协调发展的政策和行动。党的十八大首次提出了“经济建设、政治建设、文化建设、社会建设、生态文明建设五位一体总体布局”。十八届三中全会提出加快建立系统完整的生态文明制度体系，十八届四中全会要求用严格的法律制度保护生态环境。2015 年 5 月，首次以中共中央、国务院名义印发了《关于加快推进生态文明建设的意见》，这是就生态文明建设作出全面专题部署的第一个文件。2015 年 9 月中共中央、国务院印发《生态文明体制改革总体方案》指出，要求树立六大理念，即尊重自然、顺应自然、保护自然的理念，发展和保护相统一的理念，绿水青山就是金山银山的理念，自然价值和自然资本的理念，空间均衡的理念，以及山水林田湖是一个生命共同体的理念，提出到 2020 年，要构建起由自然资源资产产权制度、国土空间开发保护制度、空间规划体系、资源总量管理和全面节约制度、资源有偿使用和生态补偿制度、环境治理体系、环境治理和生态保护市场体系、生态文明绩效评价考核和责任追究制度等八项制度构成的产权清晰、多元参与、激励约束并重、系统完整的生态文明制度体系，推进生态文明领域国家治理体系和治理能力现代化，努力走向社会主义生态文明新时代。2015 年 10 月，中共中央《关于制定国民经济和社会发展第十三个五年规划的建议》提出了“生态环境质量总体改善。生产方式和生活方式绿色、低碳水平上升。

⁵ Department of Energy (2008) Twenty percent wind energy by 2030: Increasing wind energy's contribution to U.S. electricity supply. Oak Ridge Tennessee: U.S. Department of Energy.

能源资源开发利用效率大幅提高，能源和水资源消耗、建设用地、碳排放总量得到有效控制，主要污染物排放总量大幅减少。主体功能区布局和生态安全屏障基本形成”的目标。提出将资源节约和环境保护作为基本国策，促进人与自然和谐共生，加快建设主体功能区，推动低碳循环发展，全面节约和高效利用资源，加大环境治理力度，筑牢生态安全屏障。

“十三五”至今，党中央、国务院统筹推进“五位一体”总体布局和“四个全面”战略布局，提出“创新、协调、绿色、开放、共享”的新发展理念和建设“美丽中国”的宏伟目标。党的十九大立足生态文明建设取得的阶段性成果，着眼长远未来，进一步将“坚持人与自然和谐共生”作为新时代坚持和发展中国特色社会主义的基本方略之一，提出了生态文明建设是中华民族永续发展的千年大计、人与自然是生命共同体等重要论断，作出了加快生态文明体制改革、建设美丽中国的战略部署，明确了推进绿色发展、着力解决突出环境问题、加大生态系统保护力度、改革生态环境监管体制等重点任务。以上这一系列政策的出台都说明中国政府在推进生态文明建设，加大生态系统保护力度方面的决心和力度。

1.3 生态友好的发展规划和政策

1.3.1 相关规划

为促进保护与发展的平衡，我国陆续出台了一系列政策，其中最重要的是主体功能区划规划和生态红线划定。目前国家主体功能区划规划方案已经完成并付诸实施，对禁止开发区和限制开发区中的重点生态保护功能区的相关政策业已明确，同时，生态红线划定政策也要求在 2020 年之前划定生态红线，且明确了生态红线的要求与国家主体功能区划规划方案中禁止开发区的要求相同。

1) 主体功能区划

2010 年 12 月国务院正式发布《关于印发全国主体功能区规划的通知》，规划推进实现主体功能区主要目标的时间是 2020 年。《规划》将国土空间分为以下主体功能区：按开发方式，分为优化开发区域、重点开发区域、限制开发区域和禁止开发区域（图 1.9）；按开发内容，分为城市化地区、农产品主产区和重点生态功能区；按层级，分为国家和省级两个层面。本着优化结构、保护自然、集约开发、协调开发、陆海统筹等原则，优化国土开发空间布局。

《规划》中的国家层面限制开发的重点生态功能区(图 1.8)分为水源涵养型、水土保持型、防风固沙型和生物多样性维护型四种类型。规划目标是生态服务功能增强，生态环境质量改善；形成点状开发、面上保护的空间结构；形成环境友好型的产业结构；人口总量下降，人口质量提高；公共服务水平显著提高，人民生活水平明显改善。《规划》中的国家禁止开发区域是保护自然文化资源的重要区域，以及珍稀动植物基因资源保护地，要依据法律法规规定和相关规划实施强制性保护，严格控制人为因素对自然生态和文化自然遗产原真性、完整性的干扰，严禁不符合主体功能定位的各类开发活动，引导人口逐步有序转

移，实现污染物“零排放”，提高环境质量。

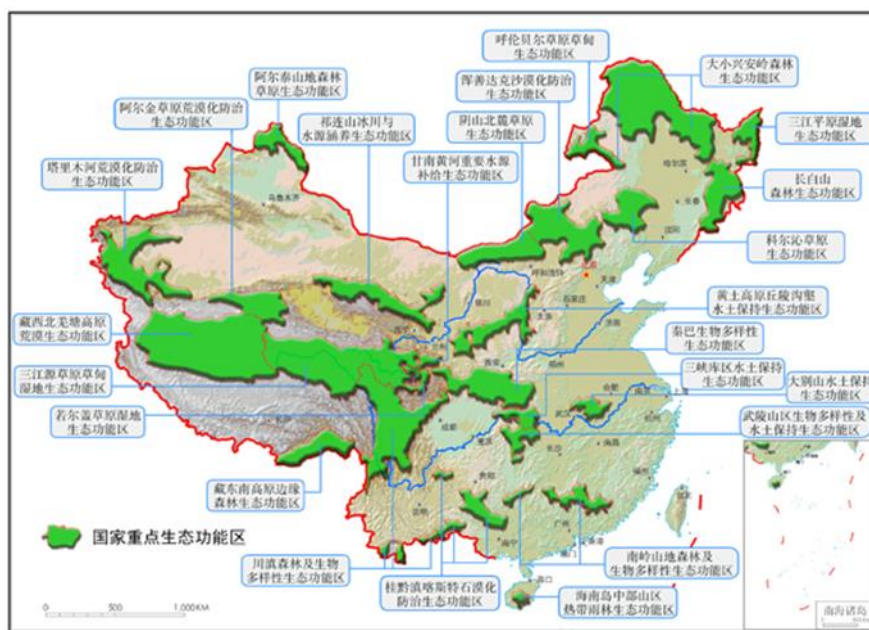


图 1.8 国家重点生态功能区示意图（国务院关于印发全国主体功能区规划的通知）

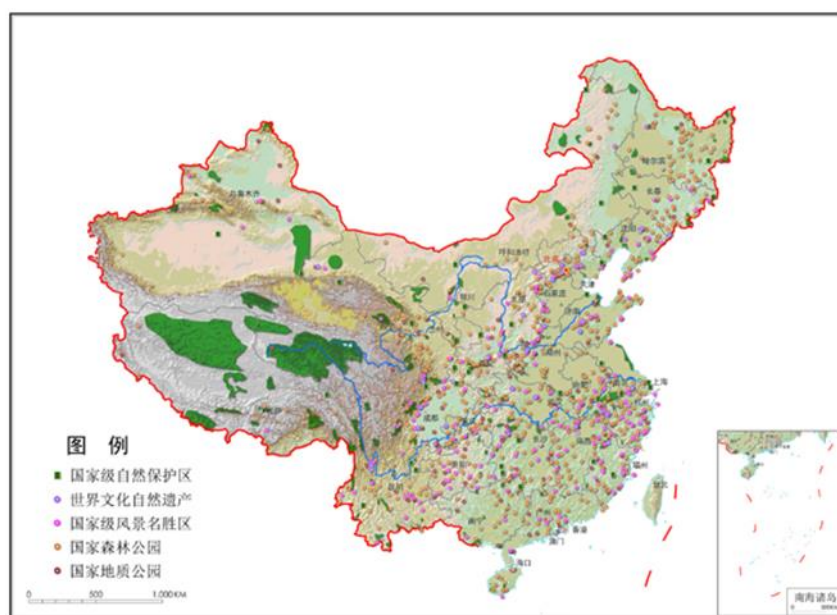


图 1.9 国家禁止开发功能区示意图（国务院关于印发全国主体功能区规划的通知）

《规划》中还对能源与资源的开发布局做出了单独的规定，不仅明确了能源基地和矿产资源基地以及水功能区分布于优化开发、重点开发、限制开发区域之中，不属于独立的主体功能区。还提出了能源基地和矿产资源基地以及水功能区的布局，要服从和服务于国家和省级主体功能区规划确定的所在区域的主体功能定位，符合该主体功能区的发展方向 and 开发原则等要求。能源基地和矿产资源基地的建设布局，要坚持“点上开发、面上保护”的原则。通过点上开发，促进经济发展，提高人民生活水平，为生态环境保护奠定基础，

同时达到面上保护目的。

《规划》指出：位于限制开发的重点生态功能区的能源基地和矿产资源基地建设，必须进行生态环境影响评估，尽可能减少对生态空间的占用，并同步修复生态环境。其中，在水资源严重短缺、环境容量很小、生态十分脆弱、地震和地质灾害频发的地区，要严格控制能源和矿产资源开发。在不损害生态功能前提下，在重点生态功能区内资源环境承载能力相对较强的特定区域，支持其因地制宜适度发展能源和矿产资源开发利用相关产业。

《规划》还强调大力发展风能、太阳能等清洁能源。风能，重点在资源丰富的西北、华北和东北以及东部沿海地区布局建设大型风电基地。太阳能，近期重点在光伏产业较发达的山东半岛、长江三角洲、珠江三角洲等地区布局建设大型太阳能基地，中远期逐步在河西走廊、兰新线、青藏线、宁夏和内蒙古沙漠边缘等地区建设大型太阳能基地。

综上，主体功能区划初步确立了资源环境相协调的空间开发格局，为生态保护和可再生能源的开发布局提供了方向。但是在指导可再生能源开发的过程中还存在以下几个问题：

- a) 划分粒度较粗，即便省级层面的主体功能区划，其划分大多数也是以县界为边界，难以对主体功能区中自然生态特征不同的区域做区别考量，在实际操作中也不足以指导可再生能源选址；
- b) 《规划》对限制开发的区域做了定性描述，如“生态十分脆弱”等，缺乏定量的、可参照的数据，可操作性差；
- c) 此外，现有的主体功能区划未考虑到气候变化情景下的生态保护需求，对气候变化的适应性有所欠缺。

2) 生态红线划定

2011年,国务院首次提出划定生态红线的生态保护策略。划定生态红线并实行永久保护,体现了国家以强制性手段实施严格生态保护的政策导向,其目的在于从国家层面统筹考虑生态环境保护工作,将资源开发利用、环境管理、生态保护等众多领域进行有机整合,协调各主管部门职责与利益,实行严格的生态保护制度,从而改革当前的生态环境保护管理体制,建立起分工明确、协调统一的严格化生态保护机制⁶。

中央办公厅、国务院办公厅于2017年2月7日,联合印发《关于划定并严守生态保护红线的若干意见》。《意见》指出:生态保护红线是指在生态空间范围内具有特殊重要生态功能、必须强制性严格保护的区域,是保障和维护国家生态安全的底线和生命线。

《意见》提出的具体目标为:2020年年底前,全面完成全国生态保护红线划定,勘界定标,基本建立生态保护红线制度,国土生态空间得到优化和有效保护,生态功能保持稳定,国家生态安全格局更加完善。到2030年,生态保护红线布局进一步优化,生态保护红线制度有效实施,生态功能显著提升,国家生态安全得到全面保障。

《意见》还进一步提出了明确划定范围、落实生态保护红线边界、有序推进划定工作等具体划定要求,明确属地管理责任、确立生态保护红线优先地位、实行严格管控、加大

⁶杨邦杰,高吉喜,邹长新.划定生态保护红线的战略意义[J].中国发展,2014(1):1-4.

生态保护补偿力度、加强生态保护与修复、建立监测网络和监管平台、开展定期评价、强化执法监督、建立考核机制、严格责任追究等严守要求，以及加强组织协调、完善政策机制、促进共同保护等具体要求。

2017年5月环保部（现生态环境部）与国家发改委联合下发了《生态保护红线划定指南》。其中提出的管控要求为：生态保护红线原则上按禁止开发区域的要求进行管理。严禁不符合主体功能定位的各类开发活动，严禁任意改变用途，确保生态功能不降低、面积不减少、性质不改变。生态保护红线内的自然生态系统结构保持相对稳定，退化生态系统功能不断改善，质量不断提升。生态保护红线边界保持相对固定，生态保护红线面积只能增加，不能减少。严格实施生态保护红线国土空间用途管制，严禁随意改变用地性质。

《指南》中确定的国家级和省级禁止开发区包括：国家公园；自然保护区；森林公园的生态保育区和核心景观区；风景名胜区的核心景区；地质公园的地质遗迹保护区；世界自然遗产的核心区和缓冲区；湿地公园的湿地保育区和恢复重建区；饮用水水源地的一级保护区；水产种质资源保护区的核心区；以及其他类型禁止开发区的核心保护区域。

依据《指南》，目前各省实际划定生态红线的过程中，仍然以各类自然保护地的核心区和缓冲区为主，缺乏对区域生态系统的梳理，对于生态保护价值高的区域代表性仍然不足。

1.3.2 相关政策、法规和标准

为了规范风电/光伏的有序开发和加强生态环境保护，国家有关部门和地方政府先后颁布了一系列管理办法（表 1.1）。

随着这些管理办法和实施方案的出台，集中式风能/光伏开发建设过程中产生的水土流失、植被破坏等问题基本得到了遏制，但仍然存在一些实践难、执行难的问题：

- 1) 当前可再生能源开发的环境影响仍以项目环评为主，生态系统是有机整体，针对单个项目的环境影响评价“只见点，不见面”，缺乏对于宏观尺度生态保护目标的统筹协调；
- 2) 相关办法均指出要做好选址建设前的环评工作，但是，地方政府和开发企业缺乏科学的工具，且相关数据难以获得，增加了环评工作的难度；
- 3) 《关于光伏电站建设使用林地有关问题的通知》等将未利用土地列为不限制开发的区域，但许多戈壁、荒漠、荒草地等未利用土地，也属自然生态系统，未利用并不等同于没有保护价值，部分未利用土地或者属于重要的自然生态系统，或者位于重要的生态廊道，或者是未来气候变化情景下的潜在重要栖息地。
- 4) 风电场建设中土地林地等使用要求和注意事项中以“禁止使用有林地”的规定最为严格，过于“一刀切”的规定将极大限制风电产业的发展，使部分有切实发展需求的地区失去发展的机会。
- 5) 关于加强风电项目生态修复、以及造成生态环境破坏的处罚措施等管理例中对于生态修复规定过于笼统，缺乏具体的操作指南和评估标准，或评估标准或只是笼统地分为合格、不合格两类，造成了实践难的局面。

表 1-1 能源发展与生态环境保护相关政策、法规、和标准

范围	发文单位	政策名称	相关规定	备注
全国性	国家发展改革委会同国土资源部和国家环保总局	《风电场工程建设用地和环境保护管理暂行办法》	《办法》第三章指出，风电场工程建设项目实行环境影响评价制度，凡涉及国家级自然保护区的风电场工程建设项目，省级环境保护行政主管部门在审批前，应征求国家环境保护行政主管部门的意见。风电规划、预可行性研究报告和可行性研究报告都要编制环境影响评价篇章，对风电建设的环境问题、拟采取措施和效果进行分析和评价，没有审批意见或审批未通过的，不得核准建设项目。	2005年8月9日发布
	国家能源局	《风电开发建设管理暂行办法》	《办法》指出风电开发在规划阶段要协调好与环境保护、土地及海域利用的关系，做好土地及海域使用、环境保护等建设条件论证，项目开发申请应包括环境影响评价，且得到环境保护部门出具的环境影响评价批复意见。	2011年8月发布
	国家林业局 (现国家林业和草原局)	《关于进一步加强国家级森林公园管理的通知》	通知指出，除《国家森林公园管理办法》规定的禁止性行为以外，国家级森林公园内原则上禁止建设垃圾处理厂、工业园区、开发区、工、光伏发电、风力发电、抽水蓄能电站、非森林公园自用的水力发电项目	有效期至2023年1月18日
		《在国家级自然保护区修筑设施审批管理暂行办法》	《办法》第三条第1小条明确指出：禁止在国家级自然保护区修筑光伏发电、风力发电、火力发电等项目的设施	2018年4月15日起生效并实施
	国家林业局	《关于光伏电站建设使用林地有关问题的通知》	1. 各类自然保护区、森林公园(含同类型国家公园)、濒危物种栖息地、天然林保护工程区以及东北内蒙古重点国有林区，为禁止建设区域。其他生态区位重要、生态脆弱、地形破碎区域，为限制建设区域。 2. 光伏电站的电池组件阵列禁止使用有林地、疏林地、未成林造林地、采伐迹地、火烧迹地，以及年降雨量400毫米以下区域覆盖度高于30%的灌木林地和年降雨量400毫米以上区域覆盖度高于50%的灌木林地。	2015年11月

			<p>3. 对于森林资源调查确定为宜林地而第二次全国土地调查确定为未利用地的土地，应采用“林光互补”用地模式，“林光互补”模式光伏电站要确保使用的宜林地不改变林地性质。</p>	
	国家林业和草原局		<p>1) 划定风电场建设禁限区域。严格保护生态功能重要、生态脆弱敏感区域的林地，特别是天然林资源。将自然遗产地、国家公园、自然保护区等区域划为风电场目禁止建设区域。其他生态区位重要、生态脆弱、地形破碎区域，为风电项目限制建设区域，具体范围由地方林业主管部门确定。</p> <p>2) 严格风电场建设使用林地范围。禁止使用有林地及国家级公益林地。</p> <p>3) 加强风电场道路建设和临时用地管理。</p> <p>4) 加强对风电场建设使用林地的指导和监管。各级林业主管部门要提介入测风选址工作，指导建设单位避让生态脆弱区和生态敏感区；定期检查，依法严厉打击未批先占、少批多占、拆分报批、以其他名义骗取用林地许可等违法违规行为。</p>	
地方性	湖北	《湖北省气候资源保护和利用条例》	<p>1) 与气候条件相关的城乡规划、国家重点建设工程、重大区域性经济开发项目和大型太阳能、风能等气候资源利用项目，其范围和强度应当严守生态红线，符合环境保护要求，应当依法进行气候可行性论证，气候可行性论证报告应当作为项目审查的内容。</p> <p>2) 完善气候可行性论证制度。尽快完成气候可行性论证目录管理编制工作，对纳入目录管理的城乡规划、国家重点建设工程、重大区域性经济开发项目和大型太阳能、风能等气候资源利用项目依法实施监督管理。</p> <p>3) 强调开发利用太阳能、风能等气候资源，其范围和强度应当严守生态保护红线、符合环境保护要求。同时明确了在工程实施和风光利用过程中的生态环境保护责任。</p>	2018年8月1日起正式施行
		《关于进一步加强全省自然保护区建设和管理工作的通知》	<p>《通知》表示，在自然保护区核心区和缓冲区内违法开展的水（风）电开发、房地产、旅游开发等活动，要立即予以关停或关闭，限期拆除，并实施生态恢复。</p>	

	山东	《山东省打好自然保护区等突出生态问题政治攻坚战作战方案（2018-2020年）》	2020年底前，45个省级及以上自然保护区核心区和缓冲区内违法开展的能源设施（水电、风电、光伏发电等）、房地产、旅游开发等活动，立即予以关停或者关闭，限期拆除，并实施生态恢复。对于实验区内未批先建、批建不符的项目，责令停止建设或使用，并恢复原状。	
		《长岛海洋生态文明综合试验区建设实施规划》	规划指出，要通过风机拆除、封山育林、海底森林营造、增殖放流等手段，建设和管理好长岛国家级自然保护区、海洋公园、地址公园等。	
	福建	《关于开展全省已建路上风电项目生态修复工作检查的通知》	专项检查重点针对项目道路建设、风机周边防护、青山挂白治理、弃土弃渣等临时用地植被恢复情况，并且对生态修复等级评判为合格、不合格两个等次。针对检查结果，对违法违规使用林地的风电企业，林业部门将按照有关法律法规查处，发改部门将其列入失信名单。对生态修复工作不达标、效果差的，要求期限整改，对整改仍不到位的，暂停其上网电费结算。	2018年起试行
		《福建省生态环境损害赔偿制度改革实施方案》	有下列情形之一的，按本实施方案要求依法追究生态环境损害赔偿责任： 1) 发生较大及以上突发环境事件的； 2) 在国家和省级主体功能区规划中划定的重点生态功能区、禁止开发区发生环境污染、生态破坏事件的； 3) 在全省陆域生态保护红线范围内发生环境污染、生态破坏事件的； 4) 在重点生态功能区、禁止开发区以及陆域生态保护红线以外的其他地区发生环境污染、生态破坏事件，直接导致区域水、大气、土壤等环境质量等级下降，或耕地、林地、绿地、湿地、饮用水水源地等功能性退化的； 5) 发生其他严重影响生态环境后果的。	
	河南	《河南省生态环境损害赔偿制度改革实施方案》	本省行政区域内有下列情形之一的，按本方案依法追究生态环境损害赔偿责任： 1) 发生较大及以上突发环境事件的；	2018全面试行

		案》	<p>2) 在国家和我省主体功能区规划中划定的重点生态功能区、禁止开发区发生环境污染、生态破坏事件的;</p> <p>3) 因污染环境、破坏生态构成犯罪并造成严重生态环境损害的;</p> <p>4) 发生其他严重影响生态环境后果的。</p>	
	江苏	《江苏省生态环境损害赔偿制度改革实施方案》	<p>1) 发生较大及以上突发环境事件的;</p> <p>2) 在国家和省级主体功能区规划中划定的重点生态功能区、禁止开发区发生环境污染、生态破坏事件的;</p> <p>3) 发生其他严重影响生态环境后果的。</p>	
	山西	《关于调整下放部分建设项目环评审批权限的通知》	<p>本次调整下放的建设项目环境影响评价审批权限和管理权限共六项, 其中包括全部风力发电项目。对生态破坏较重的风力发电等项目, 应优化选址选线, 尽量避让环境敏感区, 充分考虑对周边生物多样性的保护。</p>	

1.4 生态友好的可再生能源发展面临的主要挑战

面对日益提升的可再生能源发展需求和生态保护目标，如何在空间上平衡可再生能源的发展和生态保护就显得非常重要。梳理现有的空间规划与政策，研究发现目前我国的可再生能源发展与生态保护仍存在以下问题：

第一，在可再生能源的发展总体目标设定和省级目标设定中，目前主要考虑可再生能源的资源潜力、技术可行性以及我国的宏观经济发展预测和相关政策，未充分考虑自然生态环境的限制条件。

第二，近年来，为保护生态环境、物种多样性以及粮食安全，我国有关部门自上而下开展了针对多目标效益协调发展的空间区划-主体功能区划的划定，如重要生态功能区、农产品主产区等。初步确立了资源环境相协调的空间开发格局，为生态保护和可再生能源的开发区域提供了方向。但是，一方面，省级层面的主体功能区划分大多数是以县界为边界，划分粒度较粗，难以对主体功能区中自然生态特征不同的区域做区别考量；另一方面，现有的主体功能区划未考虑到气候变化情景下的生态保护需求。

第三，在可再生能源项目的落地建设选址过程中，国家已明确要求要进行环境影响评价。但是，一方面，针对单个开发项目的环境影响评估往往缺乏对于宏观尺度生态保护目标的统筹协调考量，无法规避各类开发建设项目对生态环境的累积影响；另一方面，由于缺乏详实的土地利用可行性数据和生态保护数据，未能从可研开始阶段就考虑生态环境影响，从而给企业的可再生能源开发带来潜在的生态风险。

第四，生态修复和生态补偿机制不足，也是造成可再生能源开发与生态保护之间产生冲突的原因之一。禁止开发区和限制开发区也有发展经济和提高人民生活水平的需求，但当前的空间规划极大地限制了上述地区的发展空间。

对上述可再生能源发展面临的问题，本研究从宏观空间规划层面进行研究，以期为国家可再生能源发展目标制定、空间规划和管理政策提供依据，为地方政府、可再生能源建设企业和环境影响评估提供科学指导和工具。

1.5 可再生能源宏观选址相关研究

集中式风能/光伏电站选址一般包括宏观选址与微观选址。宏观选址是指前期规划过程中，在一个较大范围的地域内，通过对气象、地理条件等多方面进行综合考察，确定一个或多个能源资源丰富且有利用价值的小区域的过程⁷。宏观选址是集中式风能/光伏电站项目开发的重要前期工作，对指导其发展规划、可持续开发具有重要意义。国家发展与改革委员会于 2003 年颁布了《风电场场址选择技术规定》，规定对风电场宏观选址的各种影响因素给出了一些指导性的、描述性的原则，但并未给出具有可操作性、量化的评价方法。

7 杨珺，张闯，孙秋野，王刚. 风电场选址综述[J]. 太阳能学报, 2012 (S1):136-144.

1.5.1 国内研究现状

我国学者对集中式风能/光伏电站选址及应用工具的相关研究较少。现有的研究主要集中在：风光资源评估方法、宏观选址评估方法和应用、环境影响评价等。代表性的研究工作包括：

吴培华等⁸结合国内风电场建设特点，对开发、建设过程中场址选择和机位布置进行了分析，提出风电场在考虑风资源特征的同时，还要结合征地价格、工程投资、交通、并网条件、环保要求等因素进行经济和社会效益的综合评价，但并未进行深入探讨。

Gang He⁹等对我国风光资源及风电、光伏开发的地表条件要求分别进行了分析，并对各省的潜在产能进行了计算。指出，中国年均风力发电可达到 2000-3500Twh，但由于中国风力季节性变化较大，对风资源的开发和评估更需要宏观的系统分析和规划。

邓院昌等¹⁰对我国已建成风电场的地形起伏度和坡度数据进行了统计分析，得出地形起伏度、坡度、地形适宜度专题图，为风电场宏观选址系统中地形条件的评价提供了量化指标和简单的实现方法。此外，以候选场址的交通可达性为考察因素，提出了定性的风电场开发交通条件评价指标及方法¹¹。

路正南等¹²利用 GIS 技术将风能资源分布图谱与电力负荷分布图谱进行叠加，确定双重最优下的风能资源开发价值较大的备选区域，并运用投影寻踪评价模型对备选区域进行综合评价，发现东部沿海地区和新疆北部、内蒙古西部地区具有较大的开发价值。

随着可再生能源宏观选址研究和技术的发展，国内一些能源开发公司陆续推出了风电场选址平台，基于 GIS 技术结合地理信息数据为风电场宏观、微观选址提供参考。其中自然保护区被作为生态约束因素纳入分析。

国内光伏电站选址方面的研究很少。肖建华等¹³提出了影响选址的宏观因素和微观因素，考虑的因素很全面，但并没有提出一个可以定量计算的解决方案。

张乾等¹⁴利用遥感技术获取区域太阳能资源的时空分布，结合太阳总辐射、日照时数的稳定程度、离路网的距离、离城镇的距离和坡向 5 个因子，通过设定海拔以及土地覆盖类型对应的限制区域，采用多因子评价模型对中国大型光伏电站区域适宜性进行评估，借助 GIS 进行叠加分析得到光伏电站建设的空间适宜性分布。

8 吴培华. 风电场宏观和微观选址技术分析[J].科技情报开发与经济, 2006 (15):154-155.

9 Gang He, Daniel M. kammen. Where, when and how much wind is available? A provincial-scale wind resource assessment for China [J]. Renewable Energy, 74(2014) 116-122.

10 邓院昌, 余志, 钟权伟. 风电场宏观选址中地形条件的分析与评价[J].华东电力, 2010(08): 1244-1247.

11 邓院昌, 余志, 周卉. 风电场宏观选址中交通条件的一种评价方法[J]. 华东电力, 2010(02):281-284.

12 路正南, 王健. 基于 GIS-PPE 模型的我国风能资源开发宏观选址评价[J]. 华东经济管理, 2012.(12):319-326.

13 肖建华, 姚正毅, 孙家欢. 并网太阳能光伏电站选址研究述评 [J]. 中国沙漠, 2011, 31(6):1598-1605.

14 张乾, 辛晓洲, 张海龙, 等. 基于遥感数据和多因子评价的中国地区建设光伏电站的适宜性分析[J].地球信息科学学报,2018,20(1):119-127.

1.5.2 国外研究现状

国外在集中式风能/光伏电站宏观选址技术方面已经进行了大量研究，其考虑的选址因素范围很广，并且很重视环境和社会的影响：周边居民的认可，对生态环境的影响，视觉污染等都被纳入考虑。主要研究方向有资源评估、经济性分析、环境和社会因素分析、基于 GIS 的宏观选址系统开发等。代表性的研究工作有：

加州大学伯克利分校劳伦斯伯克利国家实验室 (LBNL) 开发了 The Multi-criteria Analysis for Planning Renewable Energy (MapRE)¹⁵ 工具。MapRE 为发展中国家提供风电、太阳能发电开发提供宏观选址的评估框架和相关信息。评估因素基于成本分析展开，包括传输和道路通行的平均成本、人类足迹、风功率密度以及人口密度。

Ciaccia¹⁶ 等从社会影响和环境影响的角度研究了风电场的选址，认为有必要综合评估风电场建设的收益和负外部性，并尽量消除或转换其负外部性。Ladenburg¹⁷ 认为环境成本的上升加大了陆基风电场选址的难度，发现离岸风电由于显著降低了环境成本而越来越受到重视，但其潜在环境成本可能高于陆基风电。

Juan M.¹⁸ 等将地理信息系统 (GIS) 和多指标决策 (MCDM) 方法结合，在西班牙东部地区进行光伏太阳能发电厂宏观选址分析。利用 GIS 提取限制因素 (保护规划条例、保护区、公路、铁路、水体，山脉等)、加权条件或因素 (位置、地貌、环境和气候)；再通过使用 MCDM，对所提到的标准或因素进行加权，以评估太阳能发电厂的潜在地点。而后使用层次分析法 (AHP) 进行这些因素权重的分析和计算。

1.5.3 国内外当前研究的特点

综上所述，国内外对风电场、光伏电站宏观选址的相关研究越来越多，研究不仅仅局限于开发建设的经济分析，也开始关注社会、生态和环境影响因素。分析国内外研究现状，有以下几个特点：

- 1) 可再生能源宏观选址影响因素评价中，资源评估的研究最广泛和深入，环境影响、并网、交通条件、土地利用、地形条件的研究也逐渐增多，但生态因素方面的研究还比较少，这一特点在国内研究中更为突出；
- 2) 可再生能源宏观选址研究中，或缺乏对生态因素的考虑，或仅仅是简单地将现有保护地排除在可开发地块之外，缺乏对区域尺度生态系统的梳理，既无法避免潜在的累积影响，也无法为后续的生态修复和补偿提供科学依据；

15 <https://mapre.lbl.gov/>

16 Ciaccia G, Doni N Fontini F. Auctioning wind power sites when environmental quality matters [J] Energy Policy, 2010, 38(4):1734-1740.

17 Ladenburg J. Stated Public Preferences for On-land and Off-shore Wind Power Generation: A Review [J]. Wind Energy, 2009, 12(2): 171-181.

18 Juan M. Sánchez-Lozano, Jerónimo Teruel-Solano. Geographical Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods for the evaluation of solar farms locations: Case study in south-eastern Spain [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013 (24) 544-556.

- 3) 国内对于给定区域不特定潜在场址的综合评价方法有部分研究，并提出了系统的评价指标和评价方法，但多以定性评价为主，缺乏定量评价，且由于缺乏数据或数据质量不佳，不足以指导实际空间规划工作。
- 4) GIS 技术在宏观选址研究中的应用已经较为普遍，但国外研究相比国内仍然有一定超前，尤其在多学科方法综合应用于宏观选址方面尤为突出。

2. 研究目标和内容

2.1 本研究的意义和必要性

十八大以来党中央、国务院对绿色发展做出了全面部署，十九大提出了建设美丽中国的战略构想，因此推进绿色低碳发展和加强生态环境保护已成为生态文明建设的核心任务。可再生能源作为绿色和低碳发展的排头兵，将从补充能源向替代能源转变。针对可再生能源潜在的环境影响，要避免走“先污染后治理，先破坏后保护”的老路，协调可再生能源发展与生态保护，对上述可再生能源发展面临的问题，从宏观和微观层面进行研究，从而为国家制定可再生能源发展计划、目标分解和管理政策提供依据，为地方政府、可再生能源建设企业和环境影响评估提供科学指导和工具，十分必要。对于实现减排目标和美丽中国目标，都具有十分重要的意义。

在此背景下，大自然保护协会引入了在美国已有科学理论支持和较多成功案例的发展系统规划方法（Development by Design, DbD）。它是一种以科学为基础的规划方法，将景观尺度的保护规划与“影响消除流程”（规避-减轻-补偿）进行了融合¹⁹，以在保护与发展中谋得平衡。

DbD 工具为消除开发所造成的影响提供更为全面的解决方案，它可以识别潜在的生态风险，引导开发工程规避高生态价值区域，指导补偿资金更有效的为生态修复和保护服务。运用 DbD 方法在投资开始之前进行景观尺度上的规划，可以未雨绸缪地对开发进行主动而全面的生态风险评估；超越逐个进行项目环评的界限，在更大尺度上制定发展规划，能够明确对特定地区潜在的累积影响；制定景观层面的战略以避免影响高保护价值区域，并鼓励开发“保护发展冲突低的区域”，从而降低潜在的生态风险。该方法解决了当前生态补偿政策和具体实践的很多短板，为生态补偿过程中的关键问题提供更透明和可信的科学基础。

该工具有大量发表的研究文献、报告和书籍作为技术支撑^{20, 21, 22}，且有实地项目的验证和实施。已经在美国、澳大利亚、哥伦比亚、墨西哥、蒙古等国被应用于矿产、页岩气、油气、可再生能源等领域的发展规划，帮助各类开发工程减少生态足迹、降低生态风险。

例如，TNC 利用 DbD 方法在美国堪萨斯州开展研究，通过整合野生动物分布和风能资源分布，识别风能开发与野生动物栖息地的潜在冲突，明确风能开发过程中需要回避、可开发但需要生态补偿以及低生态风险的建议开发的区域（图 2.1），并测算了不同区域进行

¹⁹ Kiesecker, J.M., Copeland, H., Pocewicz, A., McKenney, B. 2010. Development by Design: Blending Landscape Level Planning with the Mitigation Hierarchy. *Frontiers in Ecology and the Environment* 8: 261-266.

²⁰ Kiesecker, JM, H Copeland, A Pocewicz, N Nibbelink, B McKenney, J Dahlke, M Holloran, and D Stroud 2009. A framework for implementing biodiversity offsets: selecting sites and determining scale. *BioScience* 59:77-84.

²¹ Doherty, K. E., Naugle, D.E., Copeland, H.E. Pocewicz, A. and J. M. Kiesecker. (2011). Energy development and conservation tradeoffs: systematic planning for Greater Sage-Grouse in their eastern range. Pp. 505-516 in S. T. Knick and J. W. Connelly (eds). *Greater Sage-Grouse: ecology and conservation of a landscape species and its habitats*. Studies in Avian Biology(vol. 38), University of California Press, Berkeley, CA.

²² Kiesecker, JM, H Copeland, B McKenney, A Pocewicz, and K Doherty 2011. Energy by Design: Making mitigation work for conservation and development. Chapter in: *Energy development and wildlife conservation in Western North America* (Edited by DE Naugle).

生态补偿的方案和所需要的成本。堪萨斯州的风能开发项目如遵循本分析成果进行选址，避免或抵消对生态环境的负面影响，则可以被授予“绿色认证”。此认证可以促进风电开发项目避开具有生态保护价值的区域，维护环保电力的声誉，推动风能的绿色可持续发展。

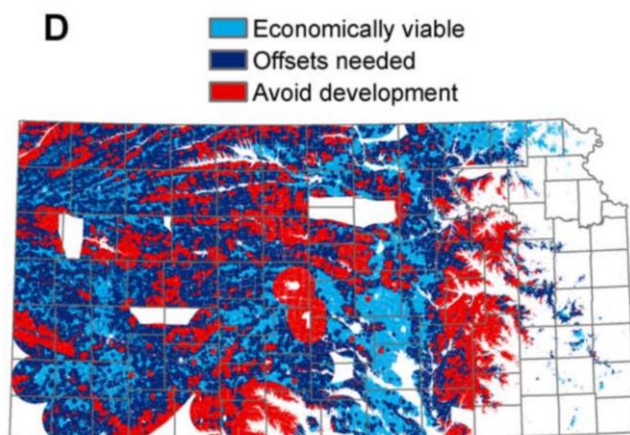


图 2.1. 堪萨斯州生态友好的风能开发空间布局：浅蓝为建议低生态风险开发区域，深蓝为可开发但需要生态补偿区域，红色为发展规避区

2.2 研究目标和内容

本研究利用 DbD 方法，将风光资源、陆地水土资源、省级主体功能区划和生态保护目标与国家可再生能源（集中式风能发电和集中式光伏发电）发展布局规划进行叠加分析，以期识别能够兼顾保护与发展的中国集中式风能/光伏发展空间布局。研究内容包括：

- 1) 当前和未来气候变化下的高生态保护价值区域识别
- 2) 当前现有集中式风能/光伏发电项目与生态保护之间的平衡性评估
- 3) 近中期集中式风能/光伏发电技术可开发区域评估
- 4) 近中期生态友好的集中式风能/光伏发电发展空间布局规划

2.3 发展系统规划方法概述

DbD 是以宏观的生态价值定量考量为背景的系统开发框架，这套方法可以识别开发和保护之间的冲突，引导开发规避高生态保护价值区域，并制定有效的生态补偿措施，以抵消开发所造成的影响。

整个方法分为四个步骤（见图 2.2）。

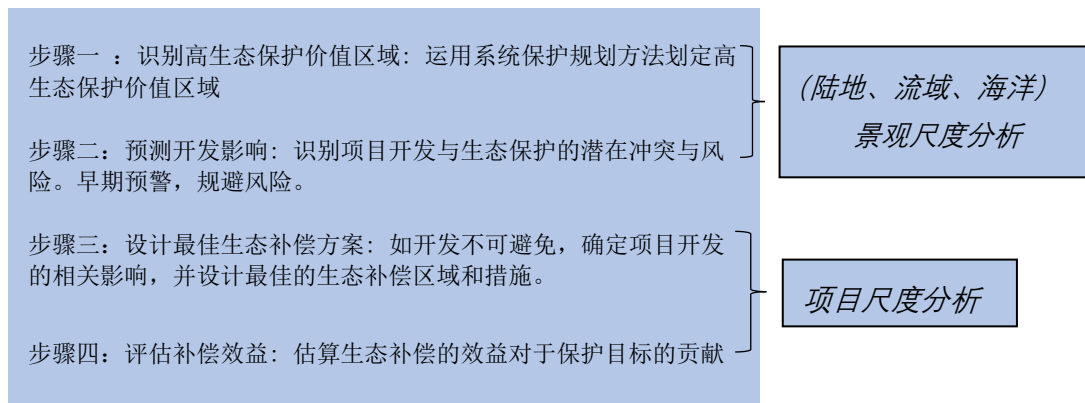


图 2.2 DbD 工具方法框架

这四个步骤从两个空间尺度（图 2.2）为决策者服务：1）在对陆地、淡水、海洋等进行投资开发之前，DbD 工具可以在景观尺度上帮助识别项目开发与生态保护的潜在冲突与风险，为项目开发选址提供定位和生态补偿等建议和参考（步骤一和步骤二）；2）针对具体的项目，DbD 可以评估开发项目对生态环境的影响，为相关项目准确设计相应的生态补偿措施，使生态修复措施能省时省力并完全抵消开发造成的生态影响（步骤三和步骤四）：

1) 景观尺度：景观尺度的分析在具体实践中适用于长期的宏观规划。

步骤一：识别高生态保护价值区域。DbD 应用的重中之重是明确的生态保护目标，即保护对象是什么和每个保护对象需要被保护多少。这个步骤帮助规划者和开发者从宏观尺度了解区域内需要被关注的动植物的栖息地和具有生态价值的地块，以及这些地块的重要程度。

该步骤的核心工作是：

- 筛选出能够代表区域生态保护价值的保护对象，并考虑纳入生态系统服务和气候变化因素。收集相应的空间分布数据。
- 利用空间优化选址模型（Marxan）计算得到生态保护价值指数分布，并识别区域内的高生态保护价值区域。

步骤二：预测开发影响：对开发可能造成的影响进行评估，并对潜在冲突和累积影响进行早期预警，识别在开发过程中哪些区域建议开发或者需要被回避、哪些区域可以开发但需要做生态补偿。

该步骤的核心工作是：

- 识别可开发区域，并对开发可能产生的影响进行评估，汇总现有的和预计的累积影响并生成相应潜在影响图层。
- 分析高生态保护价值区域和潜在影响区域之间的冲突。
- 探索“重绘”保护组合以在区域其他地区内实现保护目标的潜力。
- 根据生态保护的脆弱性（威胁程度）和生态保护价值（稀有度/独特性）以及“重绘”保护组合的潜力，提出应用缓解层级的建议。

2) 项目尺度：步骤三和步骤四主要应用于具体的开发项目和工程，可以为其制定科学的生态补偿方案。

步骤三：设计最佳生态补偿方案：评估开发项目的生态影响并设计最佳的生态补偿方案，即回答什么样的生态补偿能修复被影响区域的生态价值。首先基于开发建设可能对生态的直接或间接的影响设计生态修复的目标，而后利用空间选址模型（Marxan）来筛选适合做生态补偿的地块并评估它们的价值和现状。其目的在于使生态补偿方案符合生态等效原则，既能满足总体的生态保护目标，又能够持续抵消开发造成的影响。

该步骤的核心工作是：

- 预估直接和间接项目对生态保护目标的影响；根据这些影响设计抵消目标。
- 利用选址模型（即 Marxan）在项目区域内识别最优地块。

步骤四：评估补偿效益，即评估生态补偿方案对保护目标的贡献。生态补偿是否能抵消开发所带来的影响并达到净收益或净损失的目标？这一步骤从投资角度为投资者和开发者选择生态回报最大化的生态补偿方式——最低的投入和最小的风险。

该步骤的核心工作是：

- 评估生态补偿方案对保护目标的潜在贡献。
- 评估在高生态保护价值区中实施生态补偿的成本。评估此成本和预期保护价值，以确定将提供最高保护收益的补偿方案。

3. 研究方法 with 数据

3.1 集中式风能/光伏发展布局评估技术方法

研究运用 DbD 景观尺度的分析方法（步骤一、步骤二），对中国高生态保护价值区域进行识别，并基于对生态价值的分类划定了发展区划，对中国已有的集中式风能/光伏发电项目与生态保护之间的冲突进行评估；识别集中式风能/光伏技术可开发区域，评估近中期开发对高生态保护价值区域的潜在影响，进而提出近中期生态友好的集中式风能/光伏发电发展空间布局和发展建议，技术流程详见图 3.1，分析所用数据清单见附表 B。

步骤一：识别高生态保护价值区域，提出基于生态保护价值的发展区划。

- 1) 使用系统保护规划方法，基于自然保护区、物种分布、生态系统分布、生态系统完整性等数据资料，使用 Marxan 模型识别高生态保护价值区域，具体方法见 3.2 小节；
- 2) 整合高生态保护价值区域、省级主体区划和土地利用类型数据，并基于对生态价值的分类，将我国土地划分为不同的区域（表 3.1）。其中，发展规避区具有极高的生态保护价值，应避免集中式风能/光伏建设；高风险发展区具有较高的生态保护价值，不宜建设集中式风能/光伏，若确有发展需求，应开展适当的生态补偿措施以确保抵消对生态环境所造成的影响；低风险发展区具有较高的环境承载力，可以适当进行集中式风能/光伏建设。考虑粮食生产安全的以及耕地红线的要求，将主体功能区划中的农产品主产区中的耕地列入高风险发展区。
- 3) 评估现有集中式风能/光伏项目与生态保护之间的平衡性。将 2015 年集中式风能/光伏发电项目的地理数据²³与表 3.1 中的区域进行叠加，识别现有项目与不同生态保护价值分区的空间冲突，并评估其平衡性。

步骤二：评估近中期集中式风能/光伏发展与生态保护之间的潜在冲突，提出生态友好的发展空间布局。

- 1) 识别出风光资源以及地表条件满足集中式风能/光伏发电项目建设要求的区域²⁴，这些区域为“技术可开发区”；对于集中式风能发电，本研究考虑了“一般发展情景”与“低风速发展情景”（附表 C），具体方法见 3.3 小节。
- 2) 将“技术可开发区”与表 3.1 中的区域进行叠加，扣除发展规避区区域，识别出高风险发展区和低风险发展区中的技术可开发区，并评估以上两个技术开发区

²³ 该数据是基于截止 2015 年底公布的已建成的年集中式风能/光伏发电项目及其位置，通过在卫星影像上勾绘项目边界得到。

²⁴ 受数据精度所限，沙漠地区未能区分移动式沙丘、半固定式沙丘和固定式沙丘。造成技术可开发潜力在一定程度上被低估。

的集中式风能/光伏发电装机容量潜力。

- 3) 对标 2030 年高比例可再生能源情景下的集中式风能/光伏发电装机容量规划，评估潜在的生态影响，提出规避上述影响的发展空间布局规划。

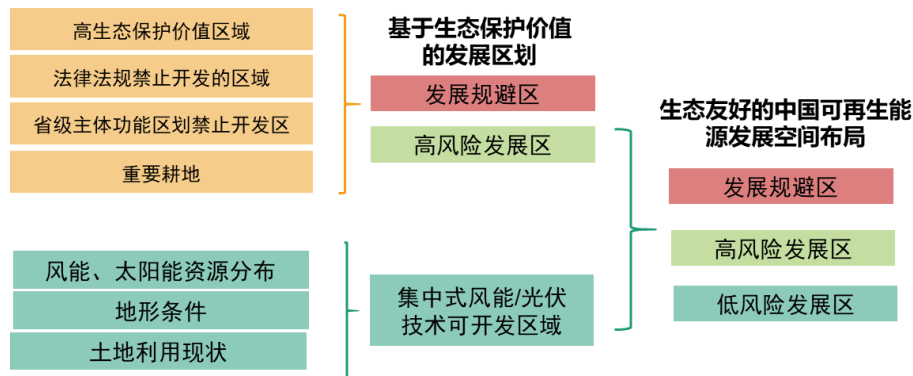


图 3.1 集中式风能/光伏发展布局评估技术流程表

表 3.1 基于生态保护价值的发展区划

区域类型	定义	描述
发展规避区	法律法规明文规定禁止开发的区域	各级别自然保护区、有林地、疏林地、灌木林地、其他林地等
	主体功能区划中的禁止开发区	见主体功能区划（附表 D）
	生态保护不可替代区，即当前及未来具有极高生态保护价值的区域	当前及 2050 年生态价值不可替代系数为 100 的区域
高风险发展区	当前及未来具有较高生态保护价值的区域	当前及 2050 年生态价值不可替代指数 50-99 的区域
	主体功能区划中的农产品主产区中的耕地	见主体功能区划附表（附表 D）
低风险发展区	主体功能区划中的限制开发区扣除高风险开发区的剩余部分	见主体功能区划附表（附表 D）
	主体功能区划中的适宜开发区域扣除高风险开发区的剩余部分	见主体功能区划附表（附表 D）

3.2 高生态保护价值区域的识别

对当前高生态保护价值区域的识别使用了经典的系统保护规划方法²⁵（Ecoregional Assessment, ERA）识别，即以生态区而非行政边界划分地理单元，从生态系统和物种两个层面分别筛选重点保护对象，设定相应的保护目标，使保护对象的数量和分布能尽可能

25 Higgins, Jonathan and Rebecca Esselman, eds. 2006. Ecoregional Assessment Toolbox. The Nature Conservancy, Arlington, VA. < <http://conservationgateway.org/era>>.

保证每个生态区能够维持其基本的生态结构和功能；同时结合资源利用和保护现状，通过计算机空间优化模型结合专家知识，最终识别高生态保护价值区域。在识别近中期高生态保护价值区域的过程中加入了对气候适宜性的评估，以考虑气候变化对生物多样性的影响，经典及气候变化下的系统保护规划方法流程如图 3.3：

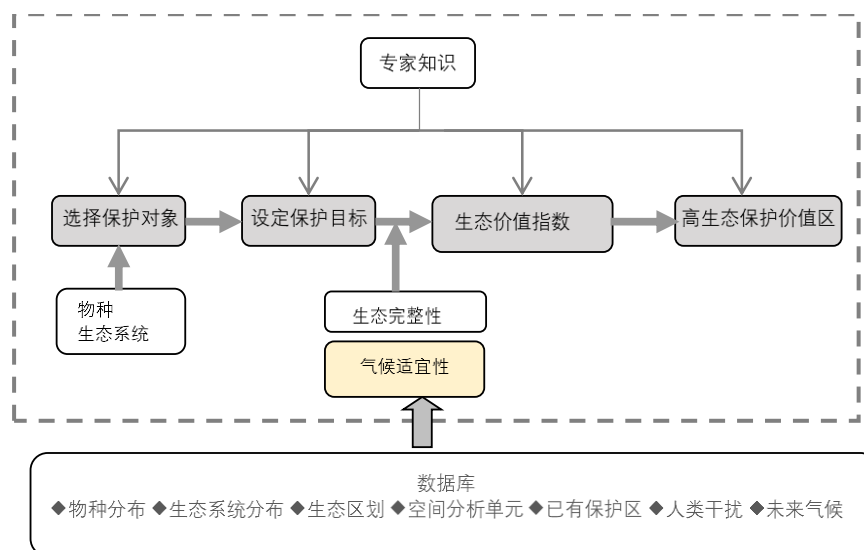


图 3.3 经典及气候变化下的系统规划方法技术流程

3.2.1 当前高生态保护价值区域的识别

经典的系统保护规划方法具体分析步骤如下：

- 1) 确定保护对象和设置保护目标。确定重点关注的能够从各个层次上代表当地生物多样性的要素（例如物种，群落，生态系统）作为保护对象，并根据保护对象的特点确定相应的保护目标，满足长期维持保护对象生态过程和进化过程的数量和分布范围。本研究沿用了《中国生物多样性中国生物多样性保护优先区确定与空缺分析报告》²⁶所确定的保护对象与保护目标，总计 96 类生态系统（包括森林生态系统 56 类，草地生态系统 18 类，荒漠生态系统类型 12 类，与湿地生态系统类型 10 类）以及 318 个代表物种（包括植物 146 种，哺乳动物 91 种，鸟类 81 种）。
- 2) 生态完整性评价。因为人类活动与保护往往会有冲突，人类活动大的地方往往保护代价相对就高，其生态完整性程度也就相对较低。在实际分析过程中，主要将人类干扰活动作为分析因子，通过标准化及叠加分析，计算出综合的生态完整性指数。
- 3) 数据收集与数据处理。围绕本专题研究的需要，专题组收集了以下几类数据资

²⁶ 2008 年，中国环境保护部环境保护对外合作中心与大自然保护协会共同发布了《中国生物多样性中国生物多样性保护优先区确定与空缺分析报告》。

料，建立了一个包括物种、生态系统、基础地理、社会经济以及已有研究成果等方面信息的综合数据库。

- a) 已有重要保护区域：提取现有生物多样性保护相关研究分析的重要区域，其中包括已建保护区、国内和国际上已识别的各类保护优先区域。依据自然保护区规划资料，采集 451 个国家级自然保护区（截至 2015 年）的分布和功能分区数据。
 - b) 保护对象分布数据：生态系统数据以 1:100 万《中国植被图》（中国科学院中国植被图编辑委员会，2001）为主，结合其他公开发表的文献和专家知识来确定生态系统的优先性和保护目标。通过专家研讨会确定重点保护物种的名录，并查阅有关物种分布、生境需求方面的文献，依据可得到的知识，制作重点保护物种的空间分布数据。
 - c) 生境完整性数据：实际操作中选择了居民点、交通线路和人为土地利用三个指标来建立空间模型，提取综合的指数图层。
 - d) 其他数据准备：生态区划分采用了世界自然基金会（WWF）在全球范围内确定的生态区作为基本规划单元，在中国有 59 个陆地生态区；以面积为 100 平方公里的六边形作为模型运算的最小单元，保护对象分布、生境适宜性及保护区网络的提取均以此为基本单位。
- 4) 高生态保护价值区域识别。计算机空间优化选择模型-MARXAN 使用生态价值不可替代系数作为识别高保护价值区域的重要依据，通过综合计算得出表示一个地理区域被包含在保护地网络中可能性的数值，其值域可以是 0 到 100，0 代表该单元不可能被划入保护地网络，即保护价值不大，100 则说明该单元在保护地网络中不可替代，即必须要被保护。本研究采用不可替代系数为 100 的区域作为生态保护极高价值区，不可替代系数 50-99 的区域为高保护价值区域(图 3.4)。

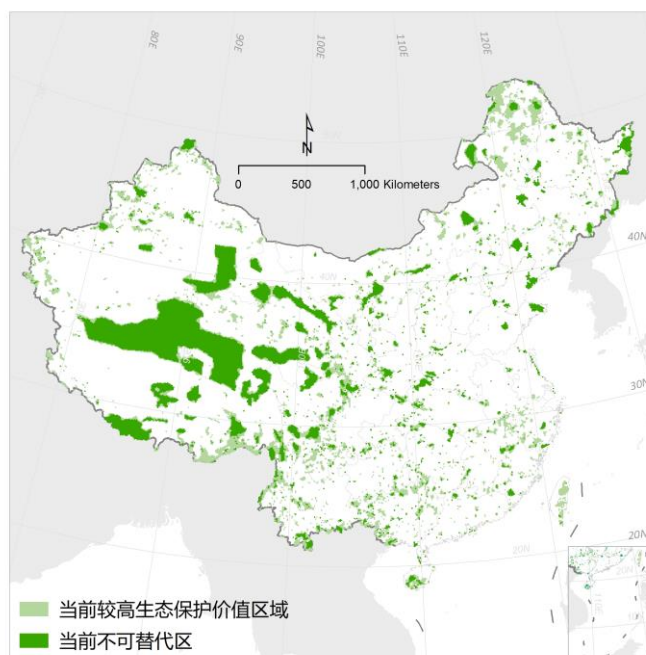


图 3.4 当前高生态保护价值区域

3.2.2 近中期高生态保护价值区域的识别

具体分析步骤与经典的生态区评估方法一致，气候适宜性数据使用 2000 – 2050 年 1km 分辨率 RegCM3 模型模拟 A1B 情景下的逐月气候数据计算气候变化强度：

Exposure Score =

$$\frac{|\Delta T_{mean}|}{\max |\Delta T_{mean}|} + \frac{SD_{T_{mean}}}{\max(SD_{T_{mean}})} + \frac{|\Delta P_{mean}|}{\max |\Delta P_{mean}|} + \frac{SD_{P_{mean}}}{\max(SD_{P_{mean}})}$$

其中： T_{mean} ， P_{mean} 分别代表优先区的年均温度、年均降水

将计算得出的气候变化强度指数与生态完整性指数结合，得出气候变化下的生态适宜性指数，代入系统保护规划流程，得出近中期高生态保护价值区域（图 3.5）

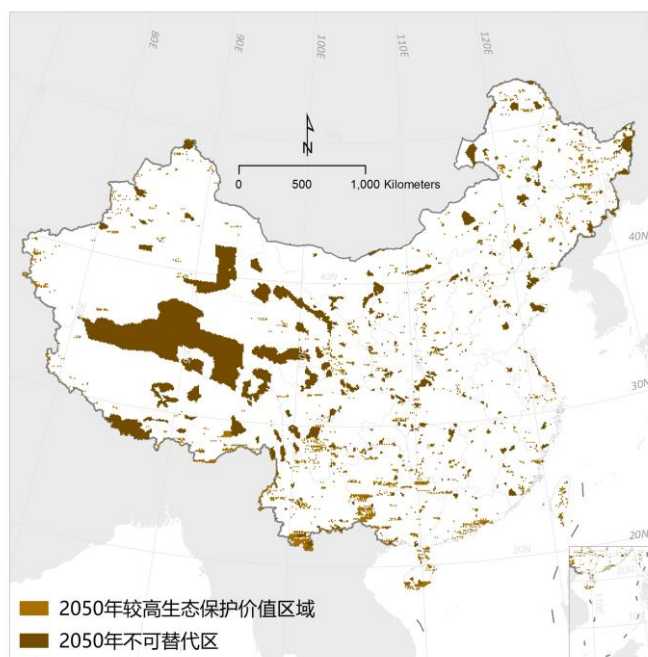


图 3.5 近中期高生态保护价值区域

3.3 近中期集中式风能/光伏技术可开发区域的识别

本研究参考风能/光伏电站宏观选址评估指标（附表 C），通过区域适宜性分析识别出风光资源以及地表条件满足集中式风能/光伏发电项目建设要求的区域。分析所使用的数据及数据来源详见附表 B。

3.3.1 近中期集中式风能技术可开发区域的识别

- 1) 资源丰富度：基于我国中东部和南方区域低风速风力资源丰富、并网消纳条件好的特点，本研究设置了“一般发展情景”与“低风速发展情景²⁷”。一般发展情景的风能密度应达到 $300\text{W}/\text{m}^2$ 以上；低风速发展情景在我国中东部、南部省份风能密度达到 $150\text{W}/\text{m}^2$ 以上，其他省份 $300\text{W}/\text{m}^2$ 以上。限于数据可获得性，本研究利用全国陆地 70m 高度层多年平均风功率密度（国家气候中心，2015）（图 3.6）对风资源丰富度进行评估。

²⁷ 低风速发展情景的中东部、南部区域包括：天津、河南、山东、安徽、湖北、湖南、江苏、浙江、上海、重庆、江西、广东、福建十三个省份。

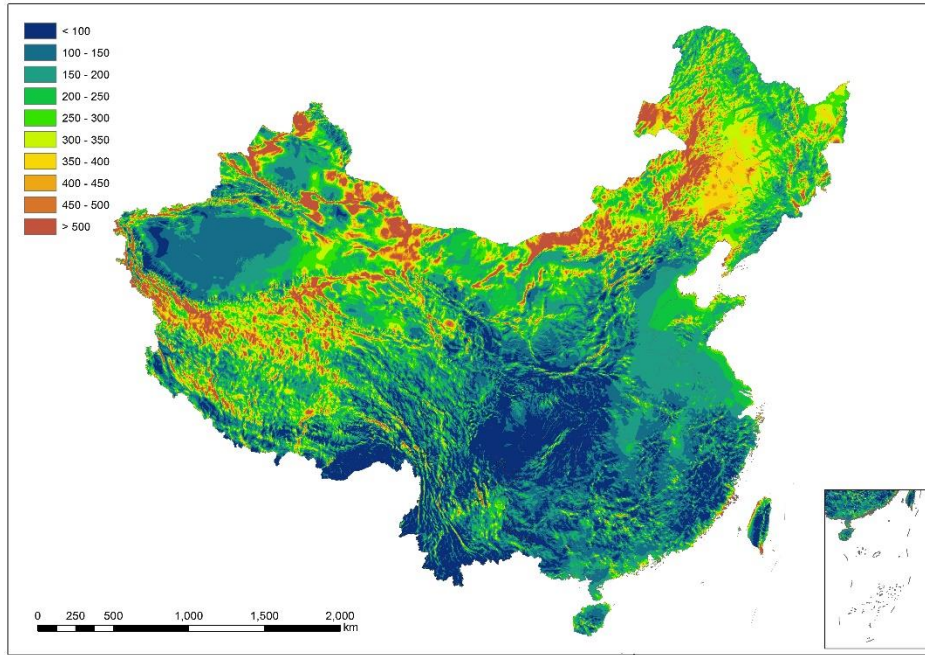


图 3.6 陆地 70m 高度层多年平均风功率密(国家气候中心)

- 2) 地形条件：在集中式风电场选址中考虑的地形条件，主要是指地形复杂程度，可用地形起伏度 (Relief Amplitude) 和坡度 (Slope) 这两个参数来表征¹⁰。考虑到研究区域尺度较大且分析粒度较粗，故只选取坡度作为地形主要参考条件。此外，随着海拔的升高，建设施工和后期保养维护的难度和成本也随之增大，海拔大于 3500m 的区域不适宜进行集中式风电场开发。本研究以目前获得广泛应用的 1km 分辨率 Hydrosheds 数字高程模型为地形数据源，利用 ArcGIS 提取得到海拔、坡度两个参数，并设定坡度 < 25%，海拔 < 3500m 的区域为技术可开发区域。
- 3) 土地利用现状：集中式风电场的选址要适当处理与各种土地资源的关系，合理利用土地，排除已使用的建设用地、城乡居民点等。研究利用 1km 分辨率的 2015 年中国土地利用现状遥感监测数据（中国科学院地理研究所，2016），排除公路、铁路、建设用地、城乡居民点等已利用的土地利用类型地块。考虑对避免居民点的噪声污染等影响，设定 1km 的缓冲距离。
- 4) 生态保护政策：国家林业局颁布的《在国家级自然保护区修筑设施审批管理暂行办法》以及国家林业和草原局颁布《关于规范风电厂项目建设使用林地的通知》（意见稿）指出，林地和自然保护区禁止进行风电开发。研究提取 2015 年中国土地利用现状遥感监测数据中分类为林地的区域，以及 451 个国家级自然保护（实际边界）、2669 个省市级自然保护区（按面积生成圆形缓冲边界），整合以上区域生成生态环境限制图层，并设定 0.5km 缓冲距离。

最终利用 ArcGIS 软件筛选出符合所有条件的区域，并排除连续面积小于 1km²的地块，得到集中式风电场技术可开发区域（图 3.7）。

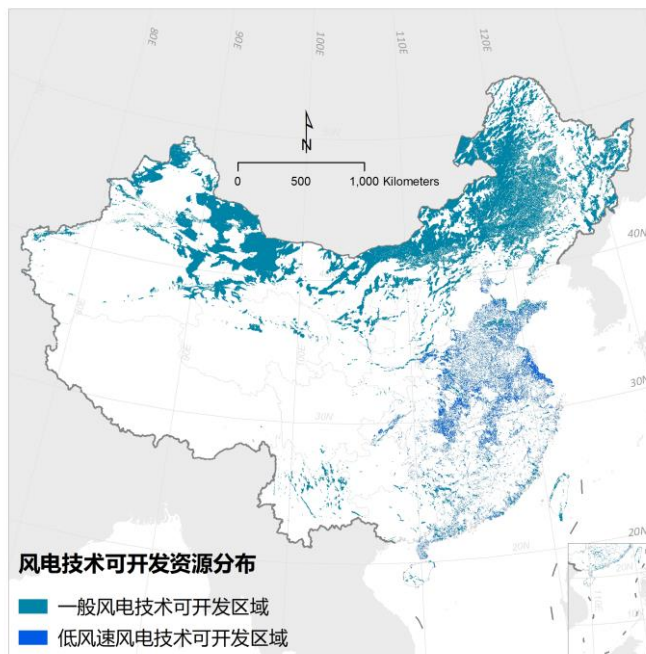


图 3.7 集中式风电场技术可开发区域

3.3.2 近中期集中式光伏技术可开发区域的识别

- 1) 资源丰富度：水平面总辐射年总量这一指标能较好反映区域的太阳能资源丰富度。本研究利用全国多年平均水平面总辐射年总量（国家气候中心，2015）（图 3.8），设定水平面总辐射年总量 $\geq 1050\text{kwh/m}^2$ 的区域作为符合可开发条件的区域²⁸。

²⁸ 国家可再生能源中心, 国家发展和改革委员会能源研究所可再生能源发展中心. 中国可再生能源产业发展报告[R]. 北京: 中国经济出版社, 2018:51-52.

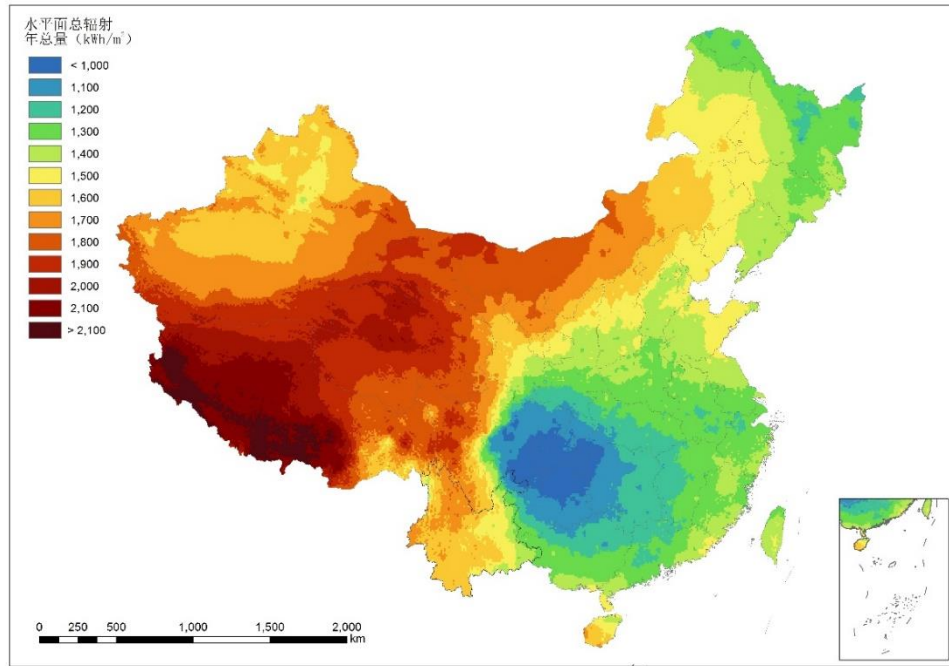


图 3.8 水平面总辐射年总量(国家气候中心)

- 2) 地形条件：影响集中式光伏电站选址的地形因素包括坡向、坡度和海拔。坡向和坡度影响着太阳辐射强度和日照时间，进而影响太阳能资源的空间分布。随着海拔的升高，建设施工和后期保养维护的难度和成本也随之增大，海拔大于 3500m 的区域不适宜进行集中式光伏电站开发。研究使用 Hydrosheds 数字高程模型为地形数据源，利用 ArcGIS 提取得到海拔、坡度、坡向三个参数，并设定海拔 < 3500m、坡度 < 3%、坡向为 > 90° 且 < 270° 的区域为集中式光伏电站技术可开发区域²⁹。
- 3) 土地利用现状：采用与集中式风电场同样的标准对土地利用现状进行评估。
- 4) 生态保护政策：采用与集中式风电场同样的标准对涉及生态保护政策的地块进行排除。

最终利用 ArcGIS 软件筛选出符合所有条件的区域，并排除连续面积小于 1km² 的地块，得到集中式光伏电站技术可开发区域（图 3.9）

²⁹ NREL, Renewable Electricity Futures Study, National Renewable Energy Laboratory, 2012.

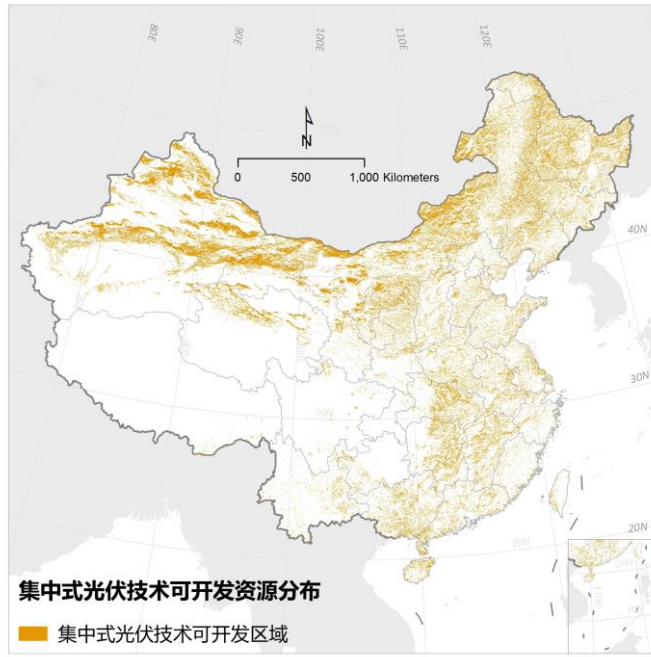


图 3.9 集中式光伏电站技术可开发区域

4. 生态友好的可再生能源（集中式风能/光伏发电）潜在发展空间布局

4.1 基于生态保护价值的发展区划

4.1.1 当前及近中期高生态保护价值区域

本研究利用系统保护规划方法，识别出当前及近中期高生态保护价值区域（方法见 3.2 节）。与当前结果相比，随着未来气候条件的变化，高生态保护价值区域的分布格局也随之发生改变（图 4.1）。为此，本研究将当前和近中期的高生态保护价值地区一同纳入考虑，以确保在气候变化的影响下，生态保护目标依然得以实现。

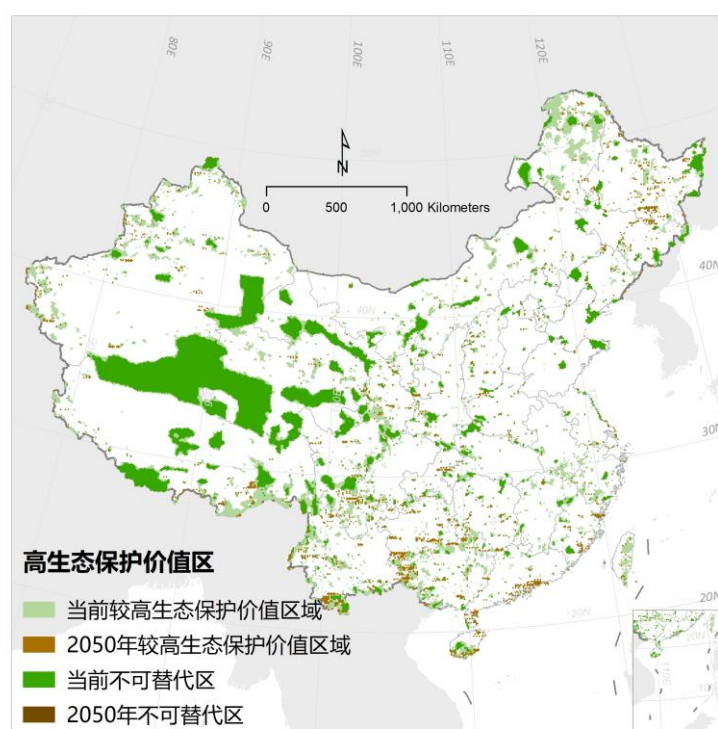


图 4.1 当前及近中期高生态保护价值区域

将当前和近中期的高生态保护价值区域进行叠加，叠加后的总体区域为本研究的高生态保护价值区。高生态保护价值区在不同省份之间的分布不同（表 4.1）。生态不可替代区面积占比最大的四个省份为青海（31.36%）、西藏（22.41%）、甘肃（18.49%）和宁夏（13.89%）。高生态价值区面积占比最大的四个省份（区域）为广西（24.92%）、海南（24.14%）、内蒙东部（21.35%）和云南（20.57%）。

表 4.1 当前及近中期高生态保护价值区域面积及其占比

地区	生态不可替代区	面积占比	高生态价值区	面积占比
安徽省	1503	1.07%	8653.553	6.17%
北京市	569	3.47%	509.7016	3.11%
福建省	5065	4.16%	17098.76	14.05%
甘肃省	74951	18.49%	41727.49	10.29%
广东省	2598	1.46%	16304.42	9.19%
广西壮族自治区	10323	4.37%	58858.12	24.92%
贵州省	4663	2.65%	28494.94	16.19%
海南省	4359	8.67%	12136.68	24.14%
河北省	4892	2.61%	3590.378	1.92%
河南省	7758	4.69%	6314.445	3.81%
黑龙江省	24944	5.51%	67447.51	14.90%
湖北省	10606	5.70%	13376.86	7.19%
湖南省	9253	4.36%	19296.09	9.10%
吉林省	11406	5.98%	17602.5	9.22%
江苏省	2601	2.58%	3973.94	3.94%
江西省	3391	2.03%	18978.49	11.36%
辽宁省	10924	7.50%	7722.478	5.31%
内蒙古自治区东部	24554	5.41%	93401.92	20.57%
内蒙古自治区西部	26549	3.83%	43608.46	6.29%
宁夏回族自治区	7203	13.89%	3919.669	7.56%
青海省	224476	31.36%	67111.11	9.38%
山东省	8934	5.79%	1961.724	1.27%
山西省	4034	2.58%	12080.53	7.72%
陕西省	8189	3.98%	15490.28	7.52%
上海市	154	2.33%	190.0203	2.87%
四川省	40563	8.38%	76137.7	15.74%
天津市	417	3.59%	1105.233	9.51%
西藏自治区	269569	22.41%	113784	9.46%
新疆维吾尔自治区	144619	8.86%	145554.3	8.92%
云南省	24827	6.48%	81807.86	21.35%
浙江省	3614	3.54%	14389.83	14.11%
重庆市	3520	4.27%	4769.181	5.78%

4.1.2 基于生态保护价值的发展区划

基于生态保护的考虑，本研究按照国家发展规划及生态保护价值（见 3.2 节），划分出了发展规避区、高风险发展区和低风险发展区(图 4.2a)。发展规避区中，占主要面积的是林地、各级自然保护区、当前及近中期不可替代区（图 4.2b）。林地主要分布于我国南方及东北林区，各级自然保护区主要分布于东北、青藏高原以及西南山地。其中东北与西南山地与图 4.3 的风光发展的技术可开发区域重叠较多，因此在未来的集中式风能发电/光伏的发展中要特别注意规避这些具有生态保护价值的地区。

基于生态价值的我国高风险发展区中，高生态价值区的空间分布格局与发展规避区类似（图 4.2c）。而农产品主产区主要分布在我国的平原地区，如松嫩平原、华北平原以及江淮地区，这些地区与低风速风能发电技术可开发区域以及光伏技术可开发区域重叠较多，因此未来集中式风能发电/光伏发展要特别注意耕地保护及修复。

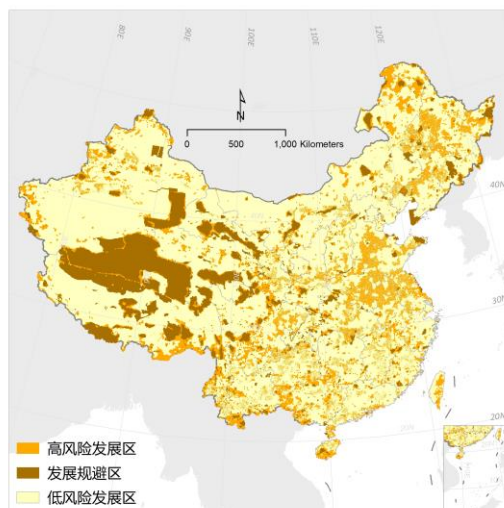


图 4.2a 基于生态保护价值的发展区划

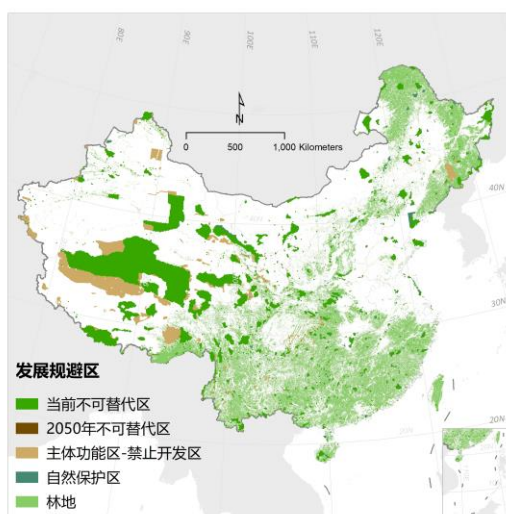


图 4.2b 发展规避区



图 4.2c 高风险发展区

4.2 现有可再生能源项目生态平衡性评估

4.2.1 现有集中式风能项目生态平衡性评估

现有集中式风能发电项目的建设，基本遵循了生态保护的宗旨。71%的项目位于低风险发展区的范围之内，但华北、西北和东北地区的部分项目位于高风险开发区，甚至是发展规避区（图 4.3）。

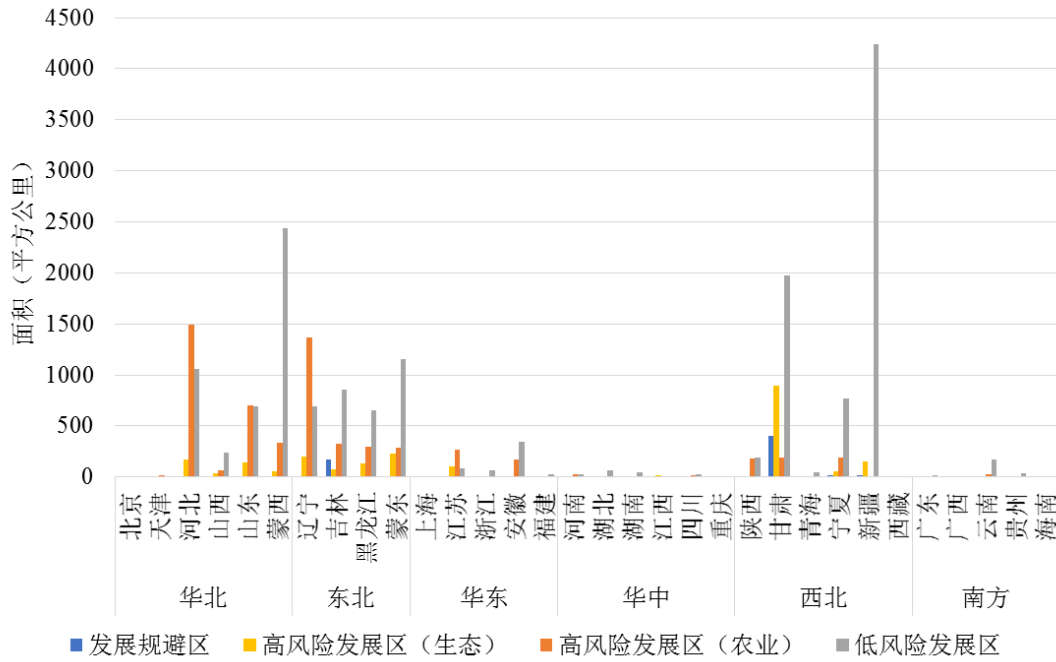


图 4.3 现有集中式风能发电项目与不同生态保护价值区域的重叠情况

在华北地区，现有风力发电项目与发展规避区重叠面积为 2.5km²，主要位于山东省境内近海地区。华北风力发电项目与高风险发展区重叠面积 3028km²，其中，与高生态保护价值区重叠 408 km²，主要位于山东省与河北省；与农产品主产区中的耕地重叠 2620km²，主要位于河北省（见图 4.4a）。

在东北地区，现有风力发电项目与发展规避区重叠面积为 169km²，主要位于吉林省西北部地区。东北风力发电项目与高风险发展区重叠面积 2923km²，其中，与高生态保护价值区重叠 640km²，主要位于辽宁省和内蒙古东部；与农产品主产区中的耕地重叠 2283km²，主要位于辽宁省（见图 4.4b）。

在华东地区，现有风力发电项目与发展规避区不存在重叠情况。华东风力发电项目与高风险发展区重叠面积为 575km²，其中，与高生态保护价值区重叠 111km²，主要位于江苏省；与农产品主产区中的耕地重叠 464km²，同样主要位于江苏省（见 4.4c）。

在华中地区，现有风力发电项目与发展规避区重叠面积为 0.69km²，主要位于重庆利川。华中风力发电项目与高风险发展区重叠面积 94km²，其中，与高生态保护价值区重叠 28km²，主要位于江西省；与农产品主产区中的耕地重叠 66km²，主要位于河南省（见图 4.4d）。

在西北地区，现有风力发电项目与发展规避区重叠面积为 442km²，主要位于甘肃省境内西北地区。西北风力发电项目与高风险发展区重叠面积 1675km²，其中，与高生态保护价值区重叠 1101km²，主要位于甘肃省；与农产品主产区中的耕地重叠 574km²，主要位于宁夏、甘肃和陕西（见图 4.4e）。

在南方地区，现有风力发电项目与发展规避区重叠面积 0.66 km²，主要位于云南省境内滇西北、滇东北地区。南方风力发电项目与高风险发展区重叠面积 69 km²，其中，与高

生态保护价值区重叠 24 km²，主要位于云南、贵州和广东；与农产品主产区中的耕地重叠 45 km²，主要位于云南（见图 4.4f）。

总体而言，华东、华中和南方地区的风电项目在生态平衡方面表现较好，西北和东北地区表现较差。甘肃省和吉林省需要特别加强风电项目生态平衡性核查，这两个省份的风电项目分别与发展规避区重叠 405 km²和 168 km²。在高风险发展区中，甘肃省和内蒙古东部分别和高生态保护价值区重叠 893 km²和 227 km²，河北省和辽宁省分别与农产品主产区中的耕地重叠 1495 km²和 1371 km²，以上三个省份也需要对现有的风电项目存量进行生态平衡性排查。

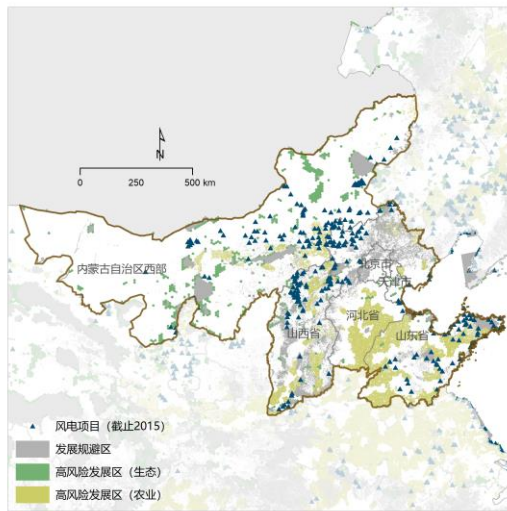


图 4.4a. 华北集中式风能项目生态平衡性

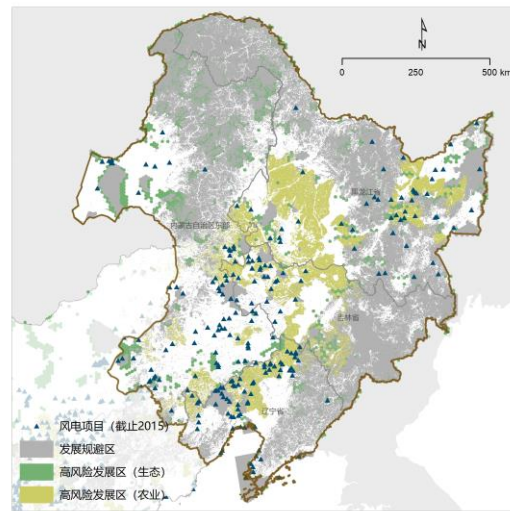


图 4.4b. 东北集中式风能项目生态平衡性

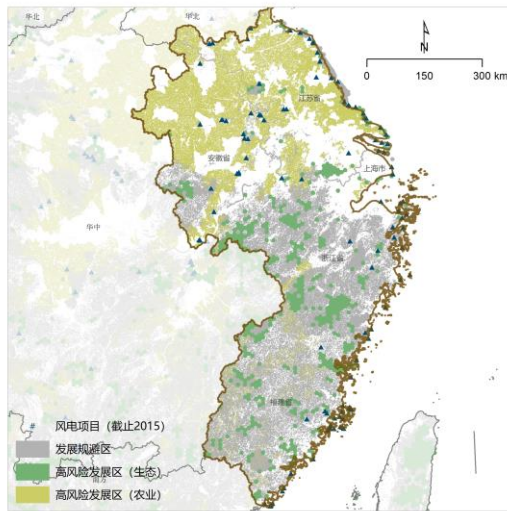


图 4.4c. 华东集中式风能项目生态平衡性

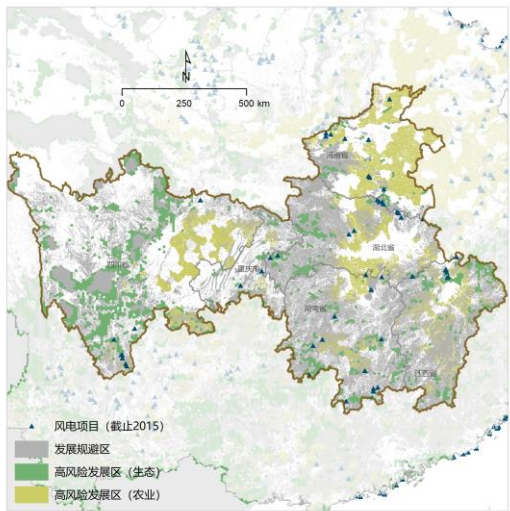


图 4.4d. 华中集中式风能项目生态平衡性

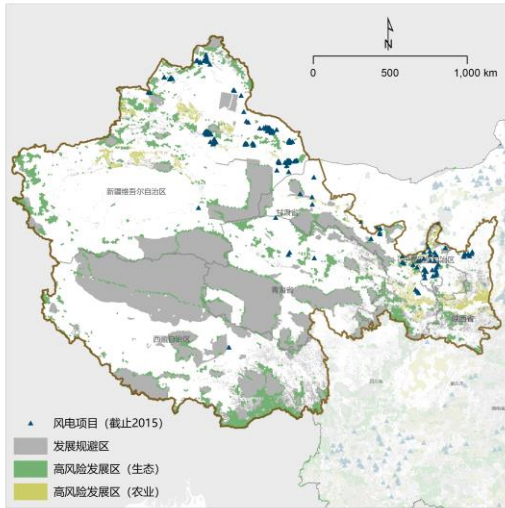


图 4.4e. 西北集中式风能项目生态平衡性

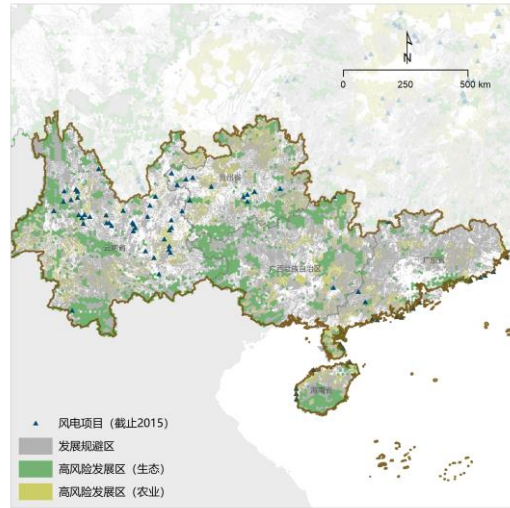


图 4.4f. 南方集中式风能项目生态平衡性

4.2.2 现有集中式光伏项目生态平衡性评估

现有集中式光伏发电项目的建设，也基本遵循了生态保护的宗旨。85%的项目位于低风险开发区范围之内，但西北的部分项目位于高风险开发区，甚至是发展规避区（图 4.5）。

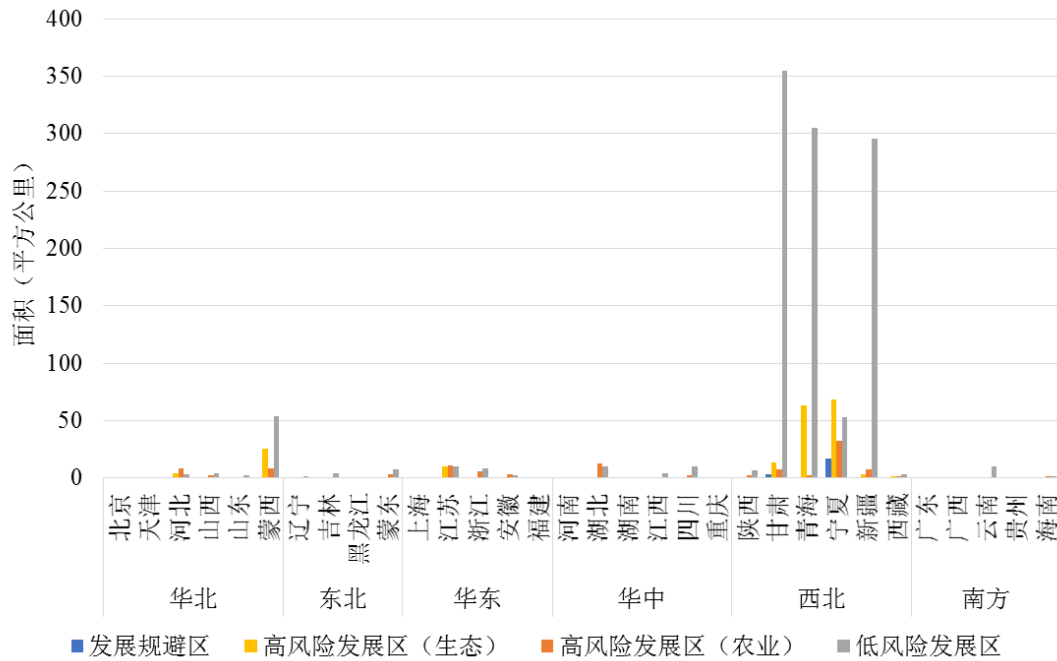


图 4.5 现有集中式光伏发电项目与不同生态保护价值区域的重叠情况

在华北地区，现有光伏发电项目与发展规避区重叠面积为 0.25km^2 ，主要位于北京市密云。华北光伏发电项目与高风险发展区重叠面积 49km^2 ，其中，与高生态保护价值区重叠 29km^2 ，主要位于内蒙古西部地区；与农产品主产区中的耕地重叠 20km^2 ，主要位于河北省

和内蒙古西部地区（见图 4.6a）。

在东北地区，现有光伏发电项目与发展规避区不存在重叠现象。东北光伏发电项目与高风险发展区重叠面积 6km^2 ，其中，与高生态保护价值区重叠 1km^2 ，主要位于内蒙古东部地区；与农产品主产区中的耕地重叠 5km^2 ，同样主要位于内蒙古东部地区（见图 4.6b）。

在华东地区，现有光伏发电项目与发展规避区重叠面积为 0.07km^2 ，主要位于上海崇明岛地区。华东光伏发电项目与高风险发展区重叠面积为 17km^2 ，其中，与高生态保护价值区重叠 11km^2 ，主要位于江苏省；与农产品主产区中的耕地重叠 20km^2 ，同样主要位于江苏省（见图 4.6c）。

在华中地区，现有光伏发电项目与发展规避区不存在重叠现象。华中光伏发电项目与高风险发展区重叠面积 17km^2 ，其中，与高生态保护价值区重叠 0.6km^2 ，主要位于湖北省；与农产品主产区中的耕地重叠 16.4km^2 ，同样主要位于湖北省（见图 4.6d）。

在西北地区，现有光伏发电项目与发展规避区重叠面积为 20km^2 ，主要位于宁夏省中卫市。西北光伏发电项目与高风险发展区重叠面积 204km^2 ，其中，与高生态保护价值区重叠 150km^2 ，主要位于宁夏和青海省（见图 4.6e）。

在南方地区，现有光伏发电项目与发展规避区不存在重叠现象。南方光伏发电项目与高风险发展区重叠面积 4km^2 ，其中，与高生态保护价值区重叠 1km^2 ，与农产品主产区中的耕地重叠 3km^2 ，均主要位于海南省（见图 4.6f）。

总体来说，除了西北地区，其他地区的光伏项目在生态平衡方面表现较好。宁夏需要特别加强光伏项目的生态平衡性核查，该省光伏项目与发展规避区重叠 17km^2 ，与高生态保护价值区重叠 68km^2 ，与农产品主产区中的耕地重叠 33km^2 。同时，与 4.2.1 节风电项目的平衡性评估结果比较，可以看出光伏项目影响的范围相对较小。

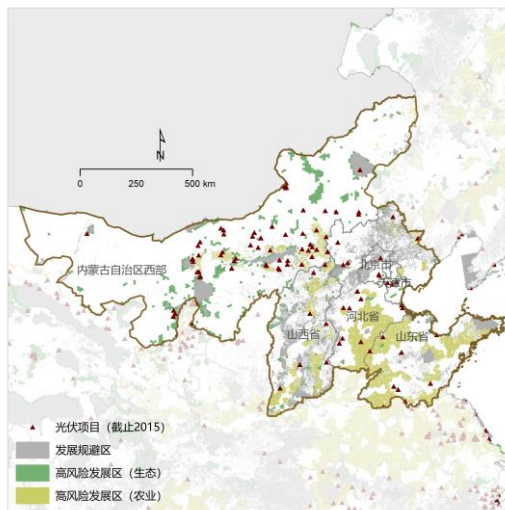


图 4.-7a. 华北集中式光伏项目生态平衡性

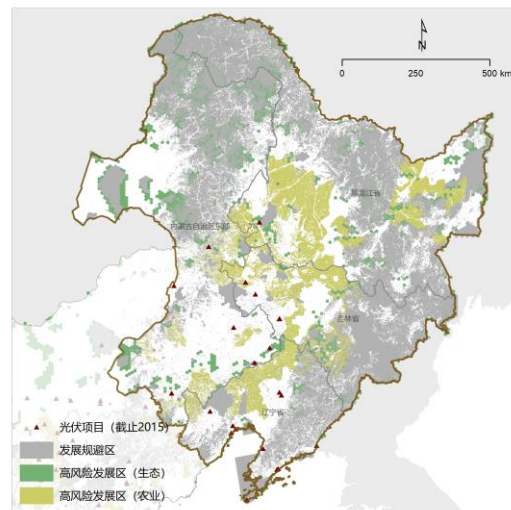


图 4.6b. 东北集中式光伏项目生态平衡性

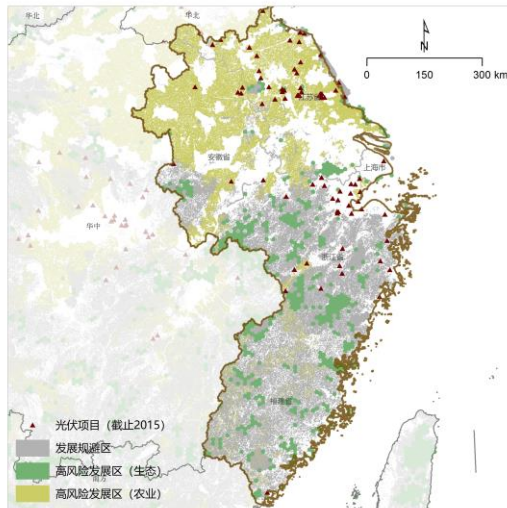


图 4.6c. 华东集中式光伏项目生态平衡性

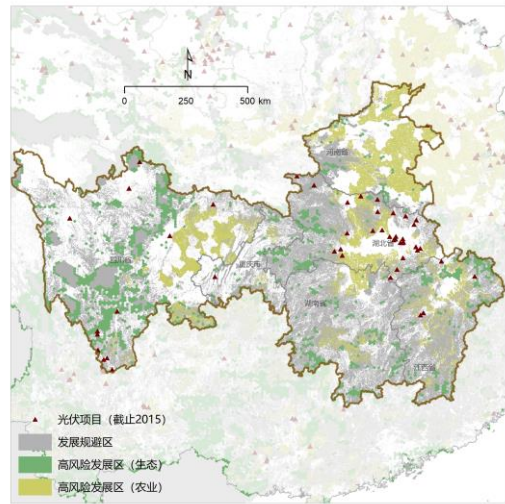


图 4.6d. 华中集中式光伏项目生态平衡性

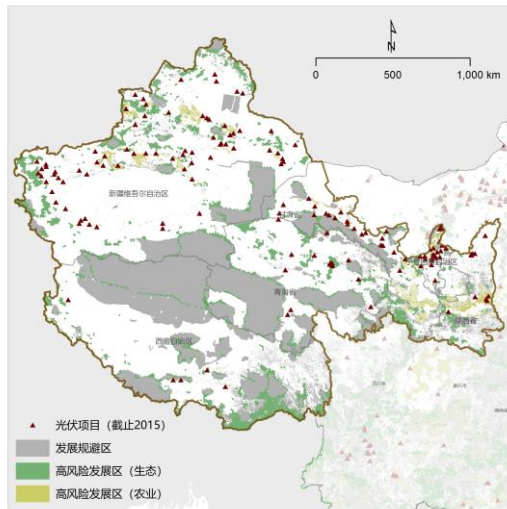


图 4.6e. 西北集中式光伏项目生态平衡性

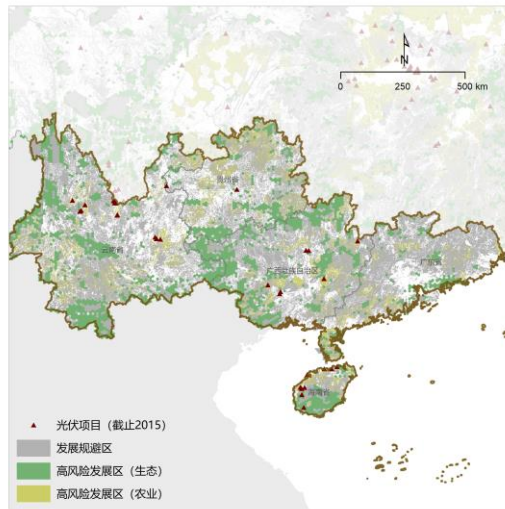


图 4.6f. 南方集中式光伏项目生态平衡性

4.3 近中期集中式风能/光伏发电技术可开发资源

根据附表 C 中所列出的排除类别，再与风能发电和集中式光伏资源分布相叠加，得到风能发电技术可开发资源分布图和集中式光伏技术可开发资源分布图（图 4.7a 和图 4.7b）。

在未考虑海上风能发电资源的情况下，我国风能发电资源主要集中于“三北”地区，资源充足，开发潜力巨大（图 4.7a）。但风能发电资源分布也存在与主要消费地脱节的问题，未来大规模开发应用需要对电源结构匹配、通道建设、储能技术开发应用，以及电网稳定和控制技术等诸多领域提前开展相应的布局与研究。随着风能发电技术的进步，我国沿海及中部地区低风速资源的开发应用已实现商业化（图 4.7a），同样具有较大的技术开发潜力，可在一定程度上缓解我国资源地与主要电力消费地之间严重不匹配的矛盾。

相对于风能发电而言，我国集中式光伏可开发的太阳能资源分布要相对均衡（图 4.7b），

但主要资源仍相对集中于“三北”地区，在电源结构匹配、通道建设、储能技术开发应用，以及电网稳定和控制技术等方面，也需要与风能发电统筹考虑。在 2017 年光伏成本明显下降、经济性大幅提高的背景下，中部及沿海地区可优先开发本地区的太阳能资源，全国范围的太阳能及风能资源开发不仅需要在空间维度上进行统筹规划与布局，也亟需在时间维度上进行统筹规划布局。

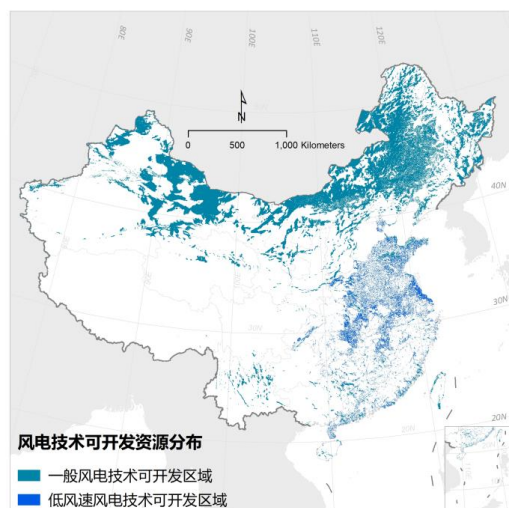


图 4.7a 集中式风能发电技术可开发资源

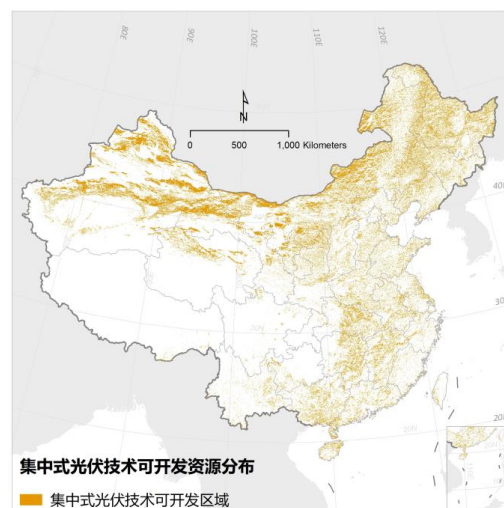


图 4.7b 集中式光伏技术可开发资源

4. 4 近中期生态友好的集中式风能/光伏发电发展空间布局

4. 4. 1 近中期生态友好的集中式风能发展空间布局

在华北地区，北京、河北、山西以及内蒙古西部地区在一般风速条件下，就可以在低风险发展区实现其高比例可再生能源目标，并且河北、山西以及内蒙古西部地区的低风险发展区还有大量的风电资源余量。然而，本研究发现，天津和山东难以在低风险发展区实现其高比例可再生能源目标。为了兼顾生态友好的发展目标，以上两个地区应考虑从河北的低风险发展区调入更多风电，或者发展分散式风电，以补足其目标缺口（图 4.8a）。

在东北地区，所有的省份地区都可以在一般风速条件下，在低风险发展区实现其高比例可再生能源目标，并且吉林、黑龙江和内蒙古东部地区的低风险发展区还有大量的风电资源余量（图 4.8b）。

在华东地区，如果只考虑一般风速条件，只有福建可以在其低风险发展区实现高比例可再生能源目标。如果考虑低风速资源，所有华东地区省份都可以在低风险发展区实现其高比例可再生能源目标，并且浙江、福建、安徽和上海还有大量的风电资源余量（图 4.8c）。

在华中地区，湖北和四川由于发电成本等原因，2030 年集中式风电装机比基准年 2015 年出现下降。如果只考虑一般风速条件，只有重庆可以在其低风险发展区实现高比例可再生能源目标。如果考虑低风速资源，河南和湖南则可以在低风险发展区实现其高比例可再

生能源目标。然而，江西难以在低风险发展区实现其高比例可再生能源目标。为了兼顾生态友好的发展目标，江西应考虑从湖北的低风险发展区调入更多风电，或者发展分散式风电，以补足其目标缺口（图 4.8d）。

在西北地区，所有的省份地区都可以在一般风速条件下，在低风险发展区实现其高比例可再生能源目标，并且甘肃、青海、宁夏和新疆的低风险发展区还有大量的风电资源余量（图 4.8e）。

在南方地区，贵州由于发电成本等原因，2030 年集中式风电装机比基准年 2015 年出现下降。广西和贵州可以在其低风险发展区实现高比例可再生能源目标，海南和广东则难以在低风险发展区实现其高比例可再生能源目标。为了兼顾生态友好的发展目标，广东省应考虑从云南的低风险发展区调入更多风电，海南应考虑发展海上风电或者分散式风电，以补足其目标缺口（图 4.8f）。

对集中式风能发电的低风险发展区和高风险发展区进行识别，发现华北、东北和西北大部分地区的低风险发展区，在一般风速条件下就可以满足 2030 年高比例可再生能源的发展需求；而华东和华中的部分地区则需要低风险发展区内发展低风速风电，才可以满足 2030 年高比例可再生能源的发展需求（表 4.2）。本研究识别出，天津、山东、江西、广东和海南五个地区在实现其高比例可再生能源目标方面，还存在一定的困难。为了兼顾生态友好的发展目标，以上地区应考虑从邻近地区的低风险发展区调入更多风电，或考虑发展分散式风电和海上风电以补足其目标缺口。

表 4.2 各省份区域不同生态价值区集中式风电装机容量潜力及 2030 年增量目标

区域	省份	2030 年较基准年 新增装机目标 (GW)	低风险发展区容量 (GW)			高风险发展区 (生态) 容量 (GW)			高风险发展区 (耕地) 容量 (GW)		
			一般风速	低风速	合计	一般风速	低风速	合计	一般风速	低风速	合计
华北	北京	0.04	0.12	3.22	3.34	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
	天津	0.87	0.00	0.00	0.00	0.00	0.68	0.68	0.00	0.00	0.00
	河北	9.27	28.07	0.00	28.07	1.92	0.00	1.92	0.02	0.00	0.02
	山西	3.85	23.83	51.23	75.06	3.19	0.00	3.19	0.99	0.00	0.99
	山东	10.48	9.01	0.00	9.01	0.57	1.44	2.02	0.77	18.16	18.92
	内蒙西部	744.86 (内蒙古整体目标)	839.27	0.00	839.27	78.63	0.00	78.63	4.46	0.00	4.46
东北	辽宁	11.37	18.08	0.00	18.08	1.08	0.00	1.08	7.54	0.00	7.54
	吉林	14.93	48.86	0.00	48.86	1.76	0.00	1.76	13.91	0.00	13.91
	黑龙江	29.24	57.86	0.00	57.86	12.59	0.00	12.59	26.60	0.00	26.60
	内蒙东部	744.86 (内蒙古整体目标)	430.68	1.44	432.12	92.26	0.00	92.26	11.51	0.00	11.51
华东	上海	0.79	0.00	12.95	12.95	0.00	0.05	0.05	0.00	0.00	0.00
	江苏	5.45	0.15	8.82	8.97	0.20	1.84	2.04	0.07	17.34	17.41
	浙江	0.45	0.38	27.79	28.17	0.14	1.49	1.63	0.00	0.44	0.44
	安徽	1.31	0.46	19.67	20.12	0.32	5.18	5.51	0.01	19.59	19.60
	福建	1.97	3.00	33.34	36.34	0.79	4.59	5.38	0.01	0.64	0.65
华中	河南	4.68	1.55	18.07	19.62	0.07	1.99	2.06	0.12	20.80	20.92
	湖北	-0.36	0.24	20.01	20.25	0.14	1.70	1.84	0.02	12.19	12.22
	湖南	1.53	0.92	19.21	20.13	0.59	4.15	4.75	0.02	4.34	4.37
	江西	1.49	0.70	0.00	0.70	0.19	4.30	4.49	0.08	7.41	7.49
	四川	-0.03	1.63	7.41	9.05	1.03	0.00	1.03	0.20	0.00	0.20
	重庆	0.24	0.52	0.00	0.52	0.03	1.20	1.24	0.05	0.04	0.09

西北	陕西	0.63	8.34	0.00	8.34	0.70	0.00	0.70	0.09	0.00	0.09
	甘肃	23.38	211.02	0.00	211.02	19.56	0.00	19.56	1.00	0.00	1.00
	青海	8.21	64.12	0.00	64.12	13.26	0.00	13.26	0.00	0.00	0.00
	宁夏	0.03	15.53	0.00	15.53	2.00	0.00	2.00	0.03	0.00	0.03
	新疆	44.71	767.77	0.00	767.77	119.03	0.00	119.03	0.50	0.00	0.50
	西藏	0.19	0.81	21.98	22.79	0.51	0.00	0.51	0.00	0.00	0.00
南方	广东	4.18	2.02	0.00	2.02	0.73	3.77	4.50	0.13	4.62	4.75
	广西	1.19	2.08	0.00	2.08	1.47	0.00	1.47	0.15	0.00	0.15
	云南	5.50	16.12	0.00	16.12	1.75	0.00	1.75	0.72	0.00	0.72
	贵州	-0.77	0.36	0.00	0.36	0.58	0.00	0.58	0.02	0.00	0.02
	海南	0.94	0.19	0.00	0.19	0.35	0.00	0.35	0.11	0.00	0.11

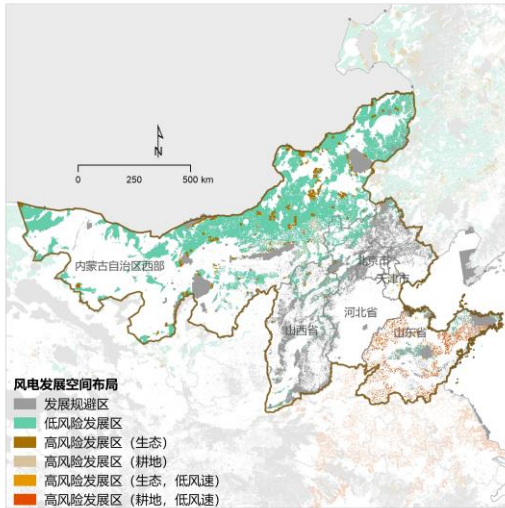


图 4.8a. 华北集中式风电发展空间布局

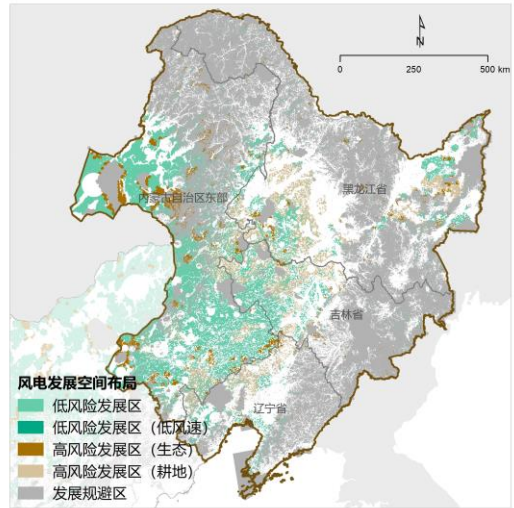


图 4.8b. 东北集中式风电发展空间布局

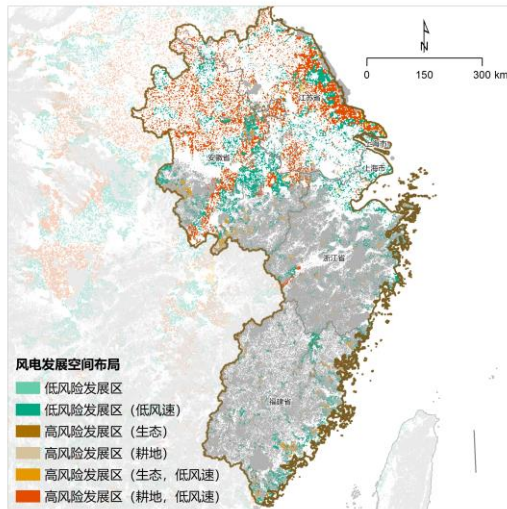


图 4.8c. 华东集中式风电发展空间布局

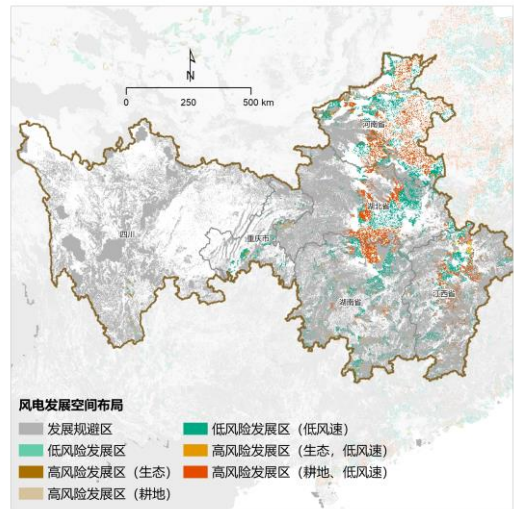


图 4.8d. 华中集中式风电发展空间布局

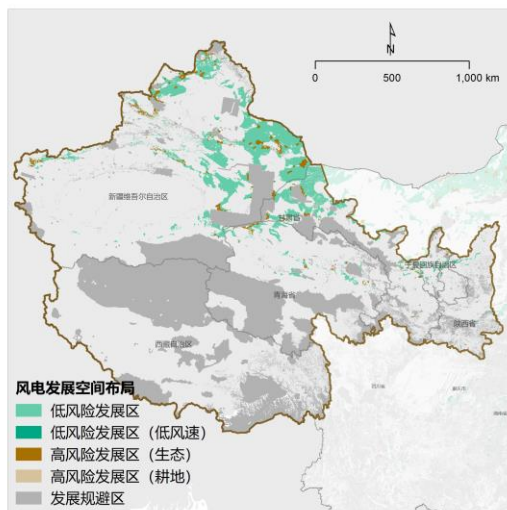


图 4.8e. 西北集中式风电发展空间布局

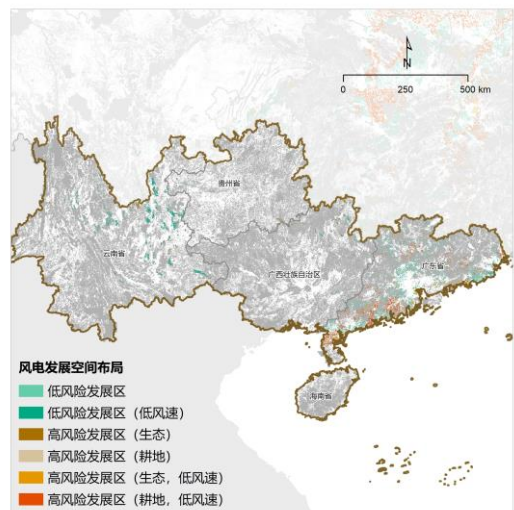


图 4.8f. 南方集中式风电发展空间布局

4.4.2 近中期生态友好的集中式光伏发电发展空间布局

在华北地区，除北京以外的所有省份地区都可以在低风险发展区实现其高比例可再生能源目标，并且河北以及内蒙古西部地区的低风险发展区还有大量的光伏资源余量。然而，北京难以在低风险发展区实现其高比例可再生能源目标，为了兼顾生态友好的发展目标，北京应考虑发展分布式光伏，或从河北和内蒙古西部地区的低风险发展区调入更多光伏电力，以补足其目标缺口（图 4.9a）。

在东北地区，所有的省份地区都可以在低风险发展区实现其高比例可再生能源目标，并且河北以及内蒙古西部地区的低风险发展区还有大量的光伏资源余量（图 4.9b）。

在华东地区，所有的省份地区都可以在低风险发展区实现其高比例可再生能源目标，并且安徽的低风险发展区还有大量的光伏资源余量（图 4.9c）。

在华中地区，重庆由于发电成本等原因，2030 年集中式光伏发电装机比基准年 2015 年出现下降。河南、湖北、湖南和江西都可以在低风险发展区实现其高比例可再生能源目标，并且以上省份的低风险发展区还有大量的光伏资源余量。然而，四川难以在低风险发展区实现其高比例可再生能源目标，为了兼顾生态友好的发展目标，四川应考虑发展分布式光伏，或从西北地区的低风险发展区调入更多光伏电力，以补足其目标缺口（图 4.9d）。

在西北地区，除了西藏以外的省份都可以在低风险发展区实现其高比例可再生能源目标，并且新疆、青海、甘肃和陕西的低风险发展区还有大量的光伏资源余量。虽然西藏的光照条件很好，但海拔 3500m 以上，搭建并运营光伏场的难度很大，因此西藏在低风险发展区的容量潜力远低于其高比例可再生能源目标。这也说明在制定宏观发展目标时，需要将更多生态环境因素纳入考量（图 4.9e）。

在南方地区，除海南以外的所有省份都可以在低风险发展区实现其高比例可再生能源目标，并且云南的低风险发展区还有大量的光伏资源余量。然而，海南难以在低风险发展区实现其高比例可再生能源目标，为了兼顾生态友好的发展目标，海南应考虑发展分布式光伏以补足其目标缺口（图 4.9f）。

对集中式光伏发电的低风险发展区和高风险发展区进行识别，发现我国大部分省份地区在低风险发展区就可以满足 2030 年高比例可再生能源的发展需求（表 4.3）。本研究识别出，北京、四川、西藏和海南三个地区在实现其高比例可再生能源目标方面，还存在一定的困难。为了兼顾生态友好的发展目标，以上地区应考虑从邻近地区的低风险发展区调入更多光伏电力，或考虑发展分散式光伏以补足其目标缺口。

表 4.3 各省份区域不同生态价值区集中式光伏装机容量潜力

区域	省份	2030 年较基准年新增装机 目标 (GW)	低风险发展区 容量 (GW)	高风险发展区 (生态) 容量 (GW)	高风险发展区 (耕地) 容量 (GW)
华北	北京	1.22	0.75	0.01	0
	天津	0.62	3.05	0	0
	河北	7.98	37.65	1.92	0.02
	山西	5.28	23.58	3.19	0.99
	山东	7.42	23.62	0.57	0.77
	内蒙西部 (内蒙古整体目标)	27.87	364.52	78.63	4.46
东北	辽宁	4.85	20.60	1.08	7.54
	吉林	5.23	30.52	1.76	13.91
	黑龙江	11.57	84.20	12.59	26.6
	内蒙东部 (内蒙古整体目标)	27.87	130.62	92.26	11.51
华东	上海	1.01	1.25	0	0
	江苏	7.23	9.61	0.2	0.07
	浙江	6.39	6.88	0.14	0
	安徽	4.92	16.37	0.32	0.01
	福建	4.68	5.25	0.79	0.01
华中	河南	5.69	20.65	0.07	0.12
	湖北	5.64	24.02	0.14	0.02
	湖南	6.21	21.89	0.59	0.02
	江西	5.37	17.09	0.19	0.08
	四川	9.53	4.65	1.03	0.2
	重庆	-0.32	0.38	0.03	0.05
西北	陕西	5.81	41.38	0.7	0.09
	甘肃	15.16	96.06	19.56	1
	青海	19.36	61.43	13.26	0
	宁夏	3.48	15.38	2	0.03
	新疆	39.41	433.69	119.03	0.5
	西藏	22.76	0.51	0.51	0
南方	广东	8.36	13.76	0.73	0.13
	广西	6.33	20.14	1.47	0.15
	云南	8.39	14.67	1.75	0.72
	贵州	3.50	4.96	0.58	0.02
	海南	1.89	1.32	0.35	0.11

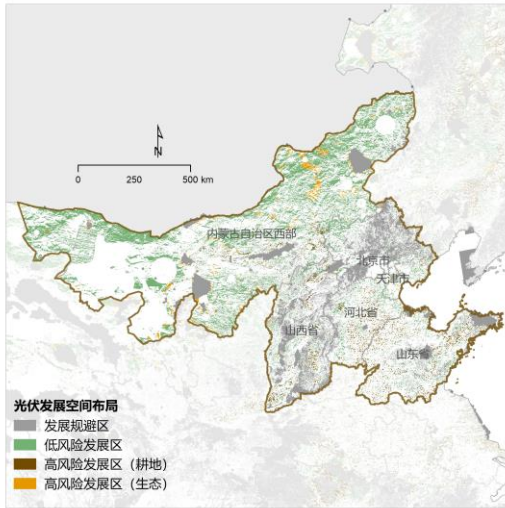


图 4.9a. 华北集中式光伏发展空间布局

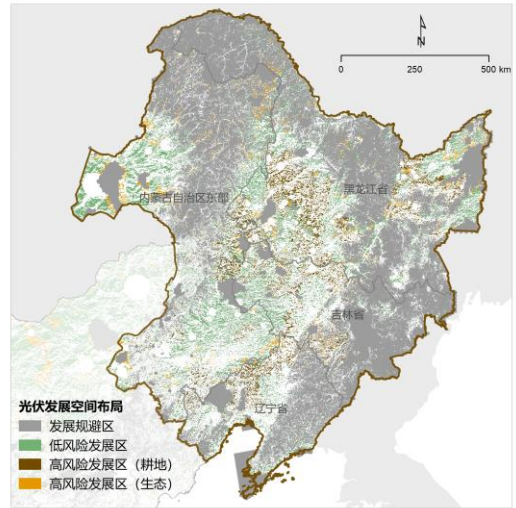


图 4.9b. 东北集中式光伏发展空间布局

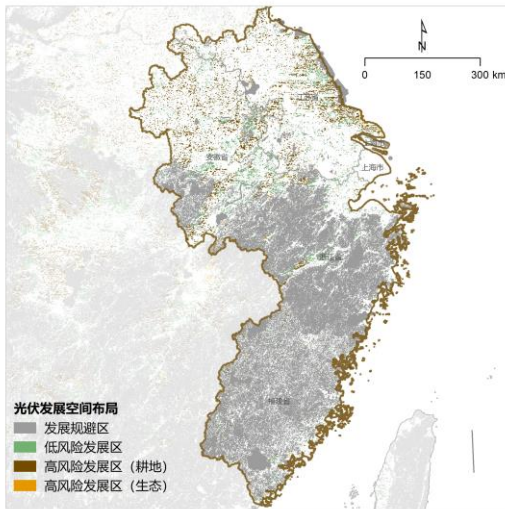


图 4.9c. 华东集中式光伏发展空间布局

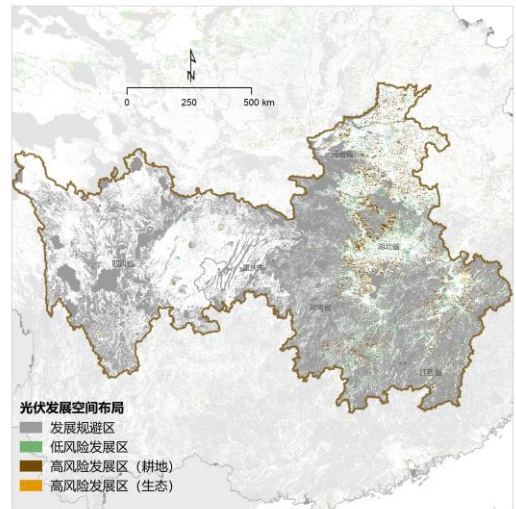


图 4.9d. 华中集中式光伏发展空间布局

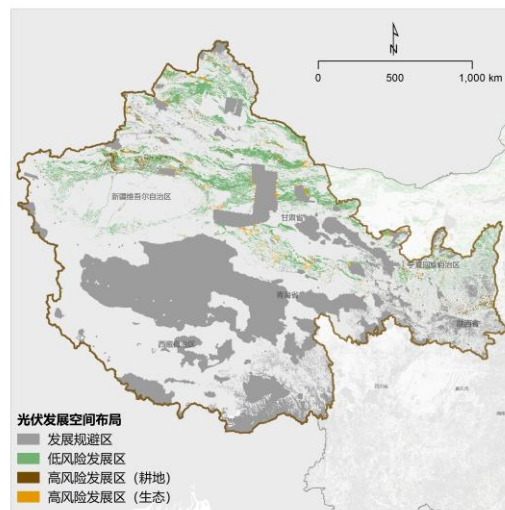


图 4.9e. 西北集中式光伏发展空间布局

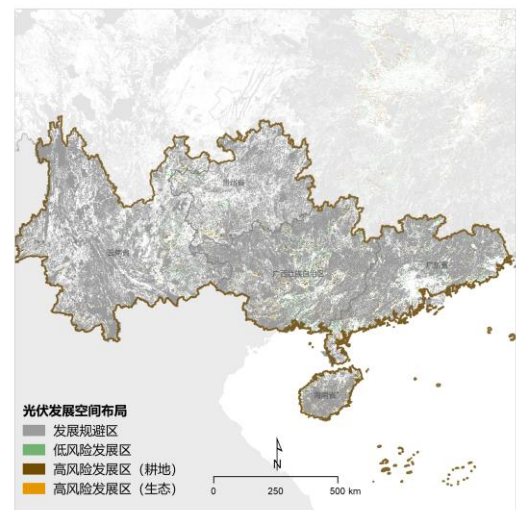


图 4.9f. 南方集中式光伏发展空间布局

5. 结果讨论与政策建议

本研究是发展系统规划方法（DbD）方法在中国的首次应用，将风光资源、陆地水土资源、省级主体功能区划和生物多样性保护目标与国家可再生能源（集中式风能发电和集中式光伏发电）发展布局规划进行整合，是对多目标空间规划的有益探索，可作为“多规合一”以及建立“国土空间规划体系”方法的参考。

在下一步的研究中，如能引进其他生态价值数据，如水源地、防护林等，对高生态保护价值区域的识别会更完善。

5.1 主要结论

通过系统的定量评估，研究得出以下几个主要结论：

- 1) 发展规避区主要分布于我国南方及东北林区，东北、青藏高原以及西南山地。其中东北与西南山地与风光发展的技术可开发区域重叠较多，因此在未来的集中式风能发电/光伏的发展中要特别注意规避这些具有生态保护价值的地区。高风险发展区中，高生态价值区的空间分布格局与发展规避区类似，农产品主产区主要分布在我国平原地区，如松嫩平原、华北平原以及江淮地区，这些地区与低风速风能发电技术可开发区域以及光伏技术可开发区域重叠较多，因此未来集中式风能发电/光伏发展要特别注意耕地保护及修复。
- 2) 在未考虑海上风能发电资源的情况下，我国风能发电资源主要集中于“三北”地区，资源充足，开发潜力巨大。未来大规模开发应用需要对电源结构匹配、通道建设、储能技术开发应用，以及电网稳定和控制技术等诸多领域提前开展相应的布局与研究工作。我国沿海及中部地区低风速资源同样具有较大的技术开发潜力，可在一定程度上缓解我国资源地与主要电力消费地之间严重不匹配的矛盾；我国集中式光伏可开发的太阳能资源分布要相对均衡，但主要资源仍相对集中于“三北”地区，在电源结构匹配、通道建设、储能技术开发应用，以及电网稳定和控制技术等方面，也需要与风能发电统筹考虑。在 2017 年光伏成本明显下降、经济性大幅提高的背景下，中部及沿海地区可优先开发本地地区的太阳能资源，全国范围的太阳能及风能资源开发不仅需要空间维度上进行统筹规划与布局，也亟需时间维度上进行统筹规划布局。
- 3) 截止到 2015 年，现有的中国集中式风能/光伏项目与生态保护之间的平衡性较好，71%的集中式风能项目和 85%的集中式光伏项目位于低风险发展区的范围之内，但华北、西北和东北地区的部分项目建设在了应该规避建设的国家级自然保护区以及高生态保护价值区域。
- 4) 对集中式风能发电的低风险发展区和高风险发展区进行识别，大部分地区仅低风险发展区就可以满足 2030 年高比例可再生能源的发展需求；天津、山东、江西、广东和海南五个地区在实现其高比例可再生能源目标方面，还存在一定

的困难。为了兼顾生态友好的发展目标，以上地区应考虑从邻近地区的低风险发展区调入更多风电，或考虑发展分散式风电和海上风电以补足其目标缺口。

- 5) 对集中式光伏发电的低风险发展区和高风险发展区进行识别，发现我国大部分省份地区在低风险发展区就可以满足 2030 年高比例可再生能源的发展需求。本研究识别出，北京、四川、西藏和海南三个地区在实现其高比例可再生能源目标方面，还存在一定的困难。为了兼顾生态友好的发展目标，以上地区应考虑从邻近地区的低风险发展区调入更多光伏电力，或考虑发展分散式光伏以补足其目标缺口。

5.2 政策建议

如本研究所示，在适当的规划和政策框架下，扩大可再生能源开发和生态保护目标并不是相互排斥的。但在可再生能源开布局过程中，还有以下相关工作需要加强：

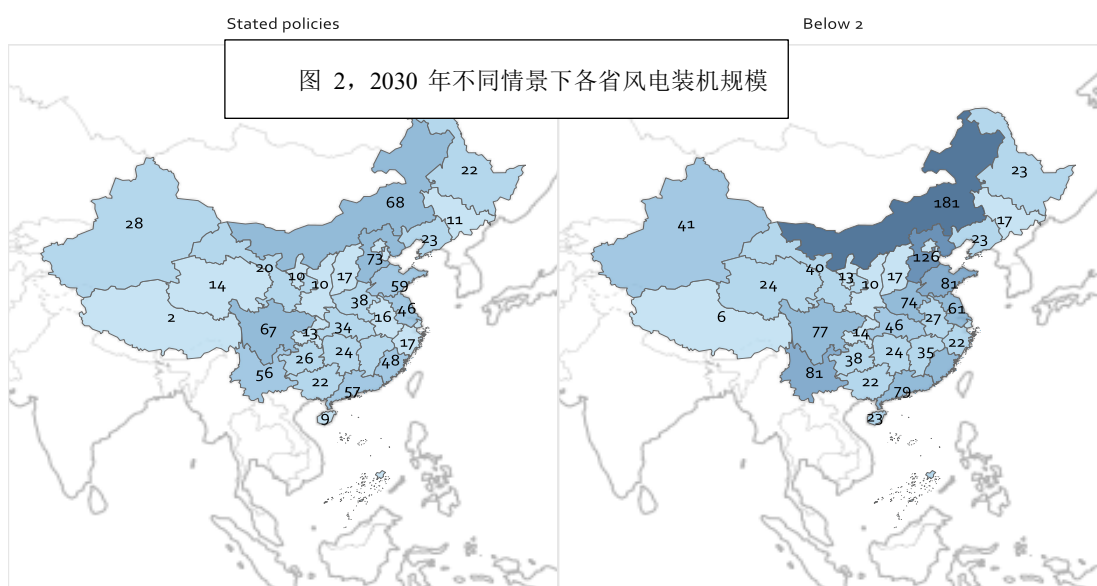
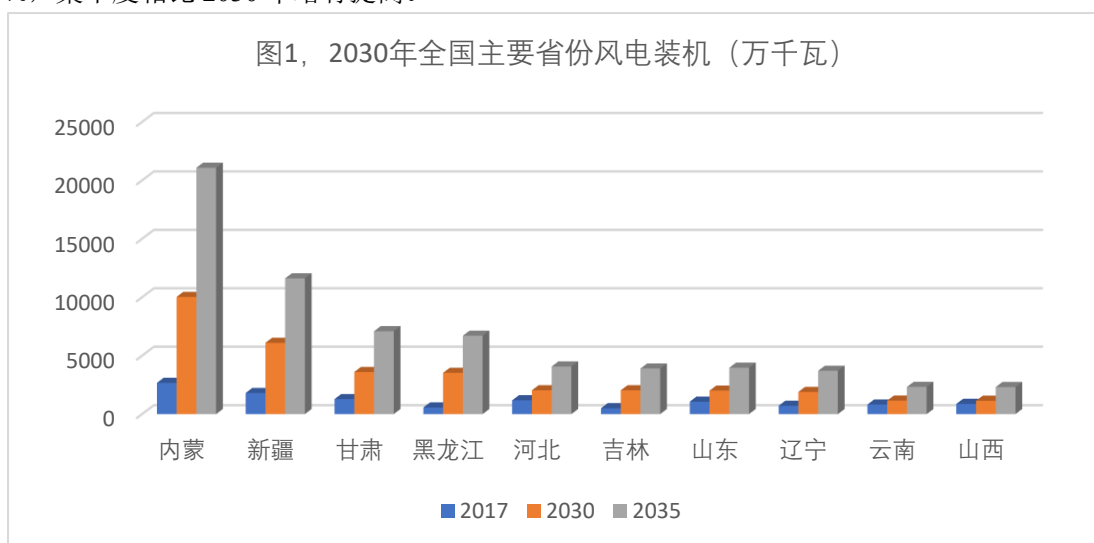
- 1) 加强能源规划管理部门与生态环境管理部门的跨部门协作。本次机构改革后，可再生能源规划管理、生态环境保护、空间规划与管理工作的分属不同部门，在可再生能源资源开布局与生态保护相平衡的工作中，各部门的相互协调统一必不可少，建立相应的协调管理机制应尽快提上议事日程。
- 2) 急需开展可再生能源开布局与生态保护之间协调性规划研究工作。在本研究工作基础上，推进与省级规划需求匹配的高分辨率景观尺度研究；早规划、早布局，尽早将研究成果纳入政府规划，使环评等工作有据可依，有据能依，这也是做好可再生资源开布局与生态保护协调平衡工作的基本前提。
- 3) 进一步加强项目事前审核及环评管理。通过对现有项目评估发现，部分地区仍存在先建设后环评，甚至为项目建设而修改保护区管理条例等现象。因此，进一步加强监督管理与审核，强化责任及追求处罚等制度约束则是当务之急。
- 4) 省级主体功能区划中的限制开发区在空间布局上亟待细化与落实。限制开发区不等同于不能开发，要做到资源开发与生态保护相协调，区域经济发展与生态保护相协调，就必须细化相应的空间布局工作，才有可能将开发与保护落到实处。
- 5) 加快研究并推动实施可落地的生态修复和生态补偿机制，平衡区域经济发展。对生态保护地区而言，要做到生态保护与经济协调发展的协调统一，建立相应的补偿机制是不可或缺的，需要给予高度重视，其相关工作要与资源开发和生态保护同时推进。
- 6) 推进国家公共数据公开化。可再生能源开规划及与生态保护平衡协调研究工作需要多部门多领域空间大数据支撑，相关公共数据供公开化透明化则是重要基础。
- 7) 在可再生能源开布局过程中，统筹考虑与我国接壤国家和地区的资源。特别是“三北”地区风能发电及集中式光伏资源开发，需要从更为宏观的视角考虑，

与蒙古国丰富的风光资源开发相结合。

附录 A 2030 年高比例可再生能源情景

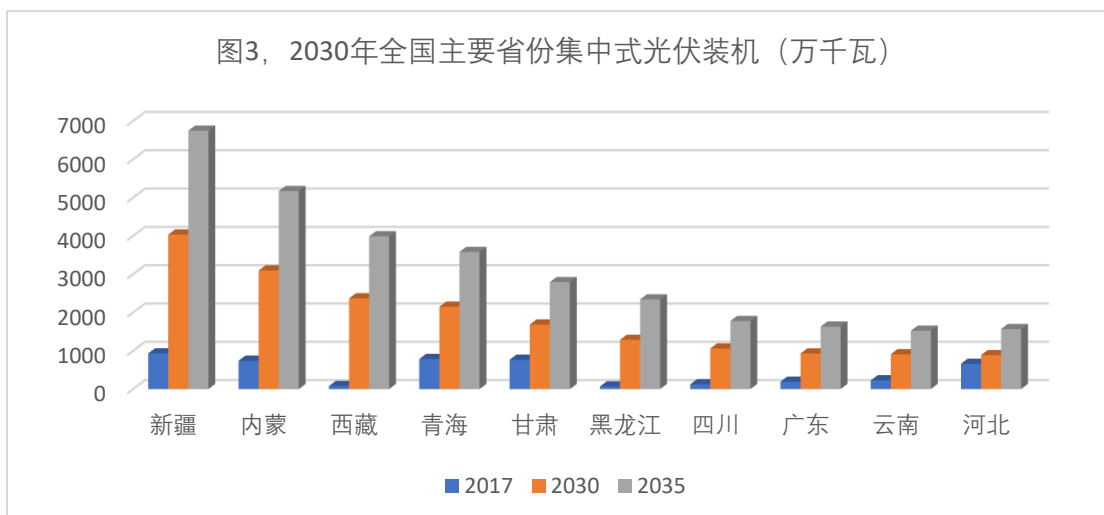
2030 年风能发展情景

能源研究所最新情景显示，到 2030 年，全国风电装机容量将达到 4.17 亿千瓦，是 2017 年的 2.5 倍，2035 年将达到 8.12 亿千瓦（高比例情景为 15.81 亿千瓦）。从地区分布看，风电新增装机将进一步向三北地区聚集，2030 年排名前十风电大省中除第 9 位的云南外，其余均为北方省份，十省的总装机容量占全国的 80.4%，比 2017 年的 72.9% 有一定程度的提高，其中内蒙一家就占到全国的 1/4（见图 1）。2035 年排名前十的省份装机容量占全国的 82.3%，集中度相比 2030 年略有提高。

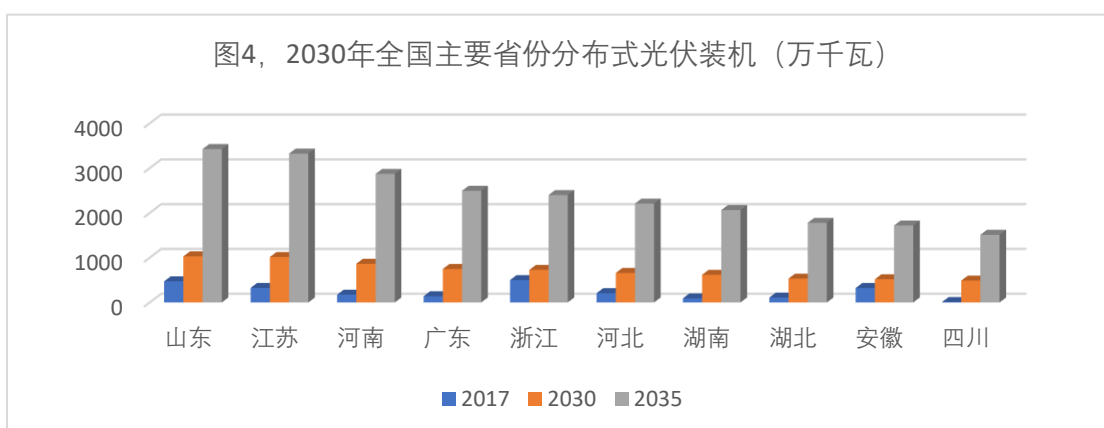


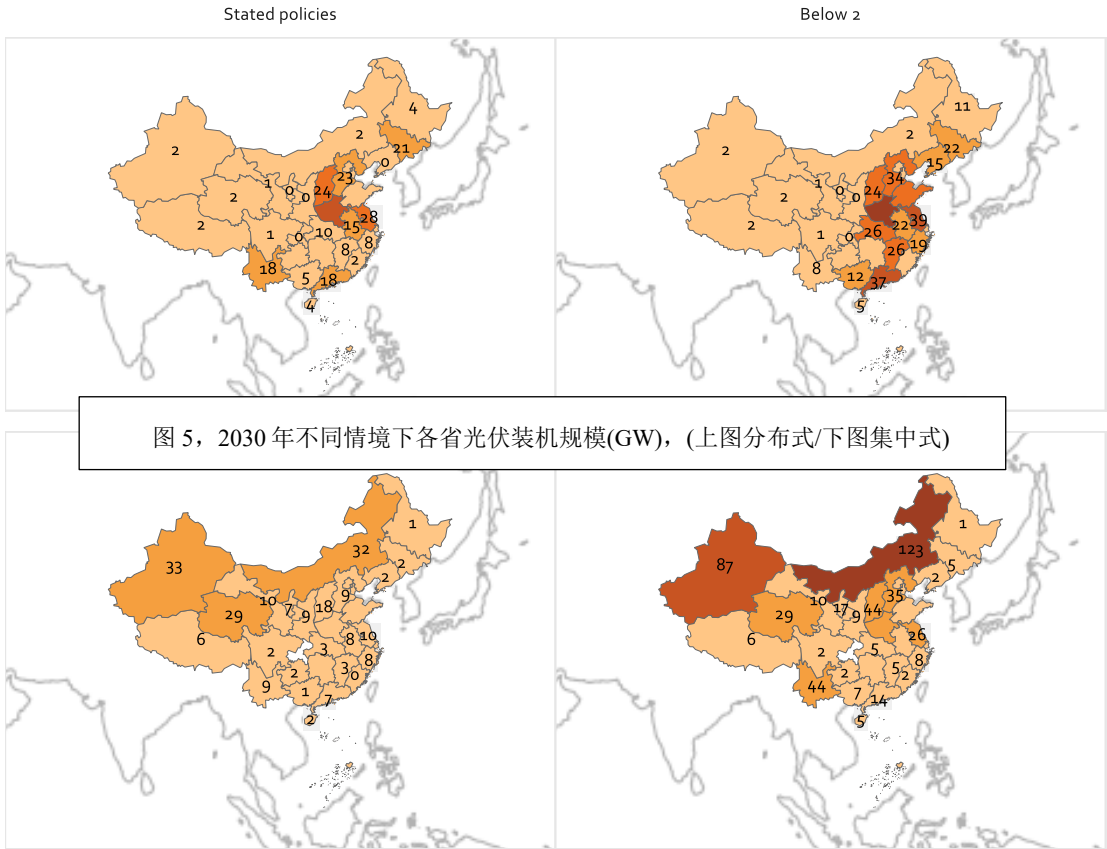
2030年太阳能发展情景

到2030年，全国集中式光伏装机容量将达到2.89亿千瓦，是2017年的2.86倍，2035年将达到4.95亿千瓦（高比例情景为7.87亿千瓦）。从地区分布看，集中式光伏新增装机将主要分布于西北、西南及部分东部与沿海省份，2030年排名前十的集中式光伏大省总装机容量占全国的63.7%，明显高于2017年45.6%的水平，新疆与内蒙两省将占到全国的1/4（见图2）。2035年排名前十的省份装机容量占全国的62.9%，集中度比2030年略有降低。



到2030年，全国分布式光伏装机容量将达到1.1亿千瓦，是2017年的3.7倍，增速明显快于集中式光伏，2035年将达到3.5亿千瓦（高比例情景为5.07亿千瓦）。从地区分布看，分布式光伏新增装机将主要分布于东部沿海和中部省份，与主要消费地基本吻合，2030年排名前十的分布式光伏大省总装机容量占全国的65.5%，低于于2017年79.1%的水平，山东与江苏两省将占到全国的1/5（见图3）。2035年排名前十的省份装机容量占全国的65.9%，集中度与2030年基本相当。分布式光伏装机在2030年之后，总体增长规模也将超过集中式光伏。





附表 B 数据清单

使用图层	数据名称	数据类型/精度	来源
各级别自然保护区	自然保护区边界(截止 2012 年)	面	项目组基于公开资料收集
林地	中国土地利用现状遥感监测数据 (2015 年)	栅格, 1km ²	中国科学院地理科学与资源研究所,资源环境数据云平台 http://www.resdc.cn/
省级主体功能区划	中国省级主体功能区划	面	项目组基于公开资料收集
生物多样性不可替代系数	中国生物多样性保护优先区数据集	面	T N C
海拔、坡度、坡向	中国数字高程模型 (DEM)	栅格, 1km ²	Hydrosheds www.hydrosheds.org
沙漠	2015 年中国土地利用现状遥感监测数据	栅格, 1km ²	中国科学院地理科学与资源研究所,资源环境数据云平台 http://www.resdc.cn/
建设用地	2015 年中国土地利用现状遥感监测数据	栅格, 1km ²	中国科学院地理科学与资源研究所,资源环境数据云平台 http://www.resdc.cn/
道路、铁路	1:100 万全国基础地理数据库	线, 1:100 万	1:100 万全国基础地理数据库 http://www.webmap.cn/
水体和湿地	2015 年中国土地利用现状遥感监测数据	栅格, 1km ²	中国科学院地理科学与资源研究所,资源环境数据云平台 http://www.resdc.cn/
已有集中式风能发电和光伏项目空间分布	已有集中式风能发电和光伏项目 (截止 2015 年)	面	项目组基于公开资料收集
风能资源分布	70m 高度分级风功率密度	栅格, 1km ²	项目组基于国家气候中心公开资料整理
太阳能资源分布	水平面总辐射年总量	栅格, 1km ²	项目组基于国家气候中心公开资料整理
2040-2070 多年年平均气温 \ 年降水	RegCM3 区域气候模型, A1B 排放情景	栅格, 1km ²	国家气候中心
当前年平均气温 \ 年降水	1961 - 2008 全国 753 个气象站点逐月 1km 分辨率内插数据	栅格, 1km ²	国家气候中心

附表 C 集中式光伏/风能发电项目技术可开发区域标准

标准	集中式光伏	风能发电场
可再生能源资源	水平面总辐射年总量 ≥1050kwh/m ²	70m 风功率密度 ≥300 w/m ² (一般发展情景) 中东部区域≥100 w/m ² , 其他区域≥300 w/m ² (低风速发展情景)
坡度	< 3%	< 25%
坡向	> 90° & < 270°	——
海拔	< 3500 m	< 3500 m
区域面积	> 1 km ²	> 1 km ²
沙漠	EX*	EX
已有集中式风能发电/光伏项目	EX	EX
城市和农村居民点	EX: 1 km	EX: 1 km
建设用地	EX	EX
道路	EX	EX
铁路	EX	EX
水体和湿地	EX	EX
生态保护限制		
所有图层	EX: 0.5 km	EX: 0.5 km

*"EX"指示排除条件及所需缓冲的距离 (如适用)

附表 D 区域发展类型

区域发展类型的分类主要依据国务院发布的《全国主体功能区规划》及各省份、自治区和直辖市提交的主体功能区划方案。

土地利用分类	主体功能区	区域特点
禁止开发	国家级禁止开发区	保护自然文化资源的重要区域，珍稀动植物基因资源保护地。
	省级禁止开发区	
	自治区级禁止开发区	
	禁止开发区*	
	首都功能核心区（北京）	北京市开发强度最高的完全城市化地区，主体功能是优化开发，同时也要保护区域内故宫等禁止开发区域，适度限制与核心区不匹配的相关功能。
限制开发	国家级农产品主产区	以提供农产品为主体功能的地区，也提供生态产品、服务产品和部分工业品。主要支持该区域增强农业综合生产能力。
	省级农产品主产区	
	自治区级农产品主产区	
	农产品产区（吉林）	
	限制开发区域_农业向导（重庆）	
	国家级重点生态功能区	以提供生态产品为主体功能的地区，也提供一定的农产品、服务产品和工业品。主要支持该区域保护和修复生态环境。
	省级重点生态功能区	
	自治区级生态功能区	
	限制开发区域_生态向导（重庆）	
	省级生态经济地区 （浙江）	兼具生态保护与适宜开发的特殊区域。
	综合生态发展区（上海）	充分发挥崇明生态优势，发展绿色生态产业，努力推进绿色发展、循环发展和低碳发展
适合开发	国家级优先开发区	经济比较发达、人口比较密集、开发强度较高、资源环境问题更加突出，从而应该优化进行工业化城镇化开发的地区。
	省级优化开发区	
	优化发展区*	
	国家级重点开发区	有一定基础、资源环境承载力较强、发展潜力较大、集聚人口和经济的条件较好，从而应该重点进行工业化城镇化开发的地区。
	省级重点开发区	
	自治区重点开发区	
	重点开发区*	

	生态涵养发展区（北京）	生态环境保护区，但北京鼓励该地区进行可再生能源发展。
*注：位于自治区的主体功能区划，未注明级别的，等同于省级主体功能区		