

DOI: 10.5846/stxb202107161912

张昌顺, 谢高地, 刘春兰, 范娜, 王小昆. 基于水源涵养参照系的中国生态系统水源涵养功能优劣评估. 生态学报, 2022, 42(22): 9250-9260.

Zhang C S, Xie G D, Liu C L, Fan N, Wang X K. Evaluation of water conservation of China's ecosystems based on benchmark. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(22): 9250-9260.

基于水源涵养参照系的中国生态系统水源涵养功能优劣评估

张昌顺^{1,2}, 谢高地^{1,2}, 刘春兰³, 范娜⁴, 王小昆^{5,*}

1 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

2 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049

3 北京市生态环境保护科学研究院, 北京 100037

4 中国寰球工程有限公司, 北京 100012

5 国家林业和草原局调查规划设计院, 北京 100714

摘要:为解决水源涵养优劣评估结果空间可比性差的问题,在拟合 1990—2018 年中国生态系统水源涵养动态数据基础上,构建基于参照系的水源涵养功能优劣等级评估方法体系,从全国和分区尺度揭示中国生态系统水源涵养功能优劣格局与演变规律,阐明该方法的优越性。结果表明:(1)2015 年中国全国生态系统水源涵养功能以差级别占主导,约占总面积的 44.8%,主要分布于西北、青藏高原、华北平原和东北平原。1990—2018 年中国生态系统水源涵养功能中等级面积显著降低,差等级面积显著增加,其余类型呈波动变化。(2)各气候区生态系统水源涵养优劣等级构成因气候、生态系统构成等差异而不同,一般为气候区愈湿润,其优良等级比重愈高。1990—2018 年,共有 10 个气候区的优、良、中、低或差等级面积发生了显著变化,主要为优、良、中等级以显著降低为主,差等级全显著增加。(3)与其他方法相比,基于参照系的生态系统水源涵养功能优劣评估法因引入分区分类评估思想,评估结果更科学,空间可比性显著提高。

关键词:生态系统;水源涵养;水源涵养参照系;优劣评价;水源涵养功能指数;国家级自然保护区

Evaluation of water conservation of China's ecosystems based on benchmark

ZHANG Changshun^{1,2}, XIE Gaodi^{1,2}, LIU Chunlan³, FAN Na⁴, WANG Xiaokun^{5,*}

1 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 College of Resources and environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Beijing Municipal Research Institute of Eco-Environmental Protection, Beijing 100037, China

4 China Huanqiu Contracting and Engineering Corporation, Beijing 100012, China

5 Academy of Inventory and Planning, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100714, China

Abstract: Water conservation was one of the important ecological service function of terrestrial ecosystems, which covered the hydrological processes of water in vegetation, soil, atmosphere and animal systems. the change in water conservation of ecosystems was not only directly affected the regional ecosystem status (e.g., regional climate hydrology, vegetation and soil conditions), but also restricted the regional social, economic and ecological sustainable development. Therefore, the evaluation of regional ecosystem water conservation function has become an important part of ecological services research. Although there were many achievements in the researches on the conception, calculation of function and value, and transfer

基金项目:国家重点研究计划(2016YFC0500204);中国科学院战略性先导专项(XDA20010202);广西科技重大专项(桂科 AA20161002-3)

收稿日期:2021-07-16; **网络出版日期:**2022-07-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangxiaokun@126.com

of ecosystem water conservation, and its ecological compensation across regions. There was still no recognized method to evaluate the level of ecosystem water conservation function, therefore, there were no comparison between most of the previous studies on the level of water conservation function. Because the water conservation calculated based on water balance method was mainly restricted by meteorological conditions, the comparability of the level of water conservation function in different periods were also lower, all those factors greatly reduced the application value of the previous evaluation on the level of regional ecosystem water conservation function. In order to solve the problem of poor comparison in the pros and cons evaluation of water conservation, the evaluation method system of grade of water resource conservation function was constructed based on the water conservation benchmark after fitting the dynamic data of China's ecosystem water conservation from 1990 to 2018, and determining the water conservation benchmark of each evaluation unit. Then the pattern and evolution of the grade of water conservation function in the Chinese ecosystems were revealed on the national and regional scales, and its advantages and disadvantages were also illustrated. The main results were as follows: (1) the grade of water conservation of China's national ecosystem was dominated by poor grade, accounting for 44.8% of the total area, and mainly distributed in northwestern China, Qinghai-Tibet Plateau, North China Plain and Northeast China Plain in 2015. The area of the medium grade of water conservation in China's ecosystem decreased significantly from 1990 to 2018, while the area of poor grade of water conservation in China's ecosystem increased significantly, and the areas of the others grades showed no significant regular fluctuations. (2) The grade composition of ecosystem water conservation was different between climate zones because of the differences in climate, ecosystem composition, human disturbance, and so on. Generally, the wetter the climate zone was, the higher proportion of the excellent grades was. There were 10 climate zones which area of the excellent, good, low, or poor grade of water conservation significantly changed from 1990 to 2018. The main performances were that the areas of excellent, good, and medium grades of ecosystem water conservation were significantly reduced, while the areas of poor grade were all increased. (3) Compared with the other two methods, the evaluation method of the ecosystem water conservation based of water conservation benchmark was more comparable and scientific due to the introduction of the research idea of subarea and classification.

Key Words: ecosystem; water conservation; water conservation benchmark; pros and cons evaluation; water conservation function index; national nature reserve

中国是一个水资源严重短缺的国家,人均水资源量只有 2300 m^3 , 约占世界平均水平的四分之一,是全球人均水资源最贫乏的国家之一。加之中国水资源时空分布不均,水土资源组合很不平衡,且水资源年际变化大,连丰、连枯年份的出现比较突出,致使中国旱涝灾害发生频繁^[1]。随着社会经济的飞速发展,中国水资源供需矛盾日益突出。水源涵养在诸多生态系统服务中处于中心地位,不仅对区域生态系统生产力、养分循环、净化环境等其他功能产生影响^[2],还制约着中国区域社会经济系统的可持续发展。正因此,生态系统水源涵养研究成为生态学、水文学、社会经济学及环境学等相关学科研究的热点^[3]。区域水源涵养核算常用的方法有水量平衡法、综合蓄水法、土壤蓄水法、调节径流法等,如李杨等用综合蓄水法定量研究了重庆缙云山典型森林水源涵养功能^[4]。刘敏超等改进综合蓄水法,用凋落物层和土壤蓄水能力代表生态系统水源涵养能力,定量评价了三江源地区生态系统涵养水源功能^[5]。张彪等用水量平衡法和土壤蓄水法定量评估了北京森林水源涵养的功能,揭示了北京森林水源涵养功能在不同林分类型和不同区位间的差异^[6]。党宏忠等用土壤蓄水法揭示了祁连山不同林分类型水文特征差异^[7]。张彪等用水量平衡法研究了京津风沙源治理工程区水源涵养功能时空演变与驱动力^[8]。刘业轩等采用水量平衡法、综合蓄水法两种方法研究了福建森林水源涵养功能,为不同区域选择适宜的评估方法提供借鉴^[9]。此外,还有其他的方法,如多因子回归法^[10]、径流量法^[11]等。由于综合蓄水法、径流量法、土壤蓄水法等需要土壤非毛管孔隙度、土壤深度、枯落物储量、冠层截留率等实测数据,致使此类方法主要应用于小尺度评估。而水量平衡法则是基于水源涵养过程机理,且具有

操作容易、数据可获取简单、核算精度高等特点,使得该法成为目前水源涵养核算应用最广的方法^[12],但此法却存在难以表征生态系统消洪减峰、延迟洪峰到来等水源涵养功能问题。

尽管国内外生态系统水源涵养研究成果斐然,但水源涵养评估主要集中于区域水源涵养功能量或价值量大小、变化及驱动力分析^[13-16],进而引起广大学者和政府部门对水源涵养在内的生态系统服务的重视。随着研究的深入和各级政府需求,生态系统水源涵养优劣评估研究日愈受到关注。目前生态系统水源涵养功能优劣评估方法主要有四种:(1)基于单位面积水源涵养量的水源涵养优劣评估法。如曹叶琳等^[17]按<100 mm、100—200 mm、200—300 mm、300—500 mm 和>500 mm 将陕西省水源涵养重要性分成弱、一般、中等、重要和极重要 5 级;傅斌等^[18]、包玉斌等^[19]也用类似的方法分别对都江堰和黄土高原生态系统水源涵养重要性进行过类似研究,只是分级标准略有差异。此法可做到栅格尺度评估,但由于水源涵养功能量大多采用水量平衡法获得,致使其评估结果往往是降雨量越高,区域水源涵养功能越强,致使该法仅适用于小尺度评估,区域或全国评估时不同区域应有不同的分级标准/阈值。(2)《资源环境承载能力监测预警技术方法(试行)》中推荐的水源涵养功能指数(单位面积水源涵养量/降水量×100)法^[20]。该法按≤3、3—10 和>10 将评价单元生态系统水源涵养功能分成低、中、高 3 级,推荐用于区县尺度评估,在栅格尺度评估时没有给出分级标准。此法在一定程度上消除了气候的影响,使得评估结果空间可比性有所提高。由于推荐采用水量平衡法核算水源涵养量,致使应用此法评估全国时评估结果依然是南高北低、东高西低的整体格局。(3)利用多指标加权求和得到水源涵养功能指数。如文志等^[21]综合土壤总孔隙度、土壤最大持水量等 6 个指标获得土壤水源涵养功能指数。由于此法需要大量空间异质性显著的实测数据,使得该法仅适用于样方尺度评估,不太适合区域或全国尺度评估。(4)水源涵养功能保有率法。该法基于 100×评价单元某类生态系统单元水源涵养量/评价单元同类最优生态系统的水源涵养量大小,确定生态系统水源涵养优劣^[22-24]。此法体现了分区分类评估的思想,可用于多尺度评估,但在最优生态系统水源涵养量确定时没有给出明确的方法,如气候带或评价单元如何确定,其面积多大比较合适?什么样的生态系统是最优生态系统?分级标准是什么?正因此,何念鹏等提出了基于理想参照系和关键指标的生态系统质量评估方法^[25],该方法不仅提出了理想参照系的概念体系,还详细阐述了理想参照系中阈值的确定方法,为生态系统水源涵养优劣评估指明了方向,是水源涵养功能保有率法的升华与实践。

综上所述,鉴于生态系统水源涵养优劣评估结果空间可比性较差的科学问题,基于理想参照系和关键指标的生态系统质量评估方法,本研究在提出水源涵养参照系概念的基础上,提出了生态系统水源涵养参照系的确定方法,构建了基于参照系的生态系统水源涵养功能优劣等级评估方法,并对比研究不同方法中国生态系统水源涵养功能优劣等级空间异质规律,阐明基于参照系的生态系统水源涵养功能优劣评估方法的优越性,以期为区域或国家尺度生态系统水源涵养功能优劣评估提供方法和技术支撑。

1 数据与方法

1.1 水源涵养核算

单位面积水源涵养量采用水量平衡方程核算。水量平衡原理是指在一定的时空内,水分的运动保持着物质守恒定理,或输入的水量和输出的水量之间的差额等于系统内蓄水的变化量。

$$Q_{\text{water conservation}} = P - R - ET$$

式中, $Q_{\text{water conservation}}$ 为单位面积水源涵养量, mm/m^2 ; P 为单位面积降雨量, mm/m^2 ; R 为单位面积地表径流量, mm/m^2 ; ET 为单位面积蒸散发量, mm/m^2 。在没有人为干扰条件下,降水量减去蒸散量等于产水量,故在此先利用 INVEST 软件产水模块核算出产水量,再利用各类生态系统平均地表径流系数、土地覆被和年降水量数据获得单位面积地表径流量,进而获得单位面积水源涵养量。具体核算方法详见文献^[13, 16]。本研究利用 CERN 台站水文监测数据对核算结果进行验证,结果表明,模型拟合结果与台站野外监测结果极显著线性相关,说明本研究模型拟合结果较科学合理。图 1 是 2010 年 CERN 台站实测值和拟合值的数量关系。

1.2 参照系确定

本研究的水源涵养参照系指在适宜环境、未受或极少人为活动干扰、主要受气候驱动条件下,评估单元优良生态系统水源涵养平均值。何念鹏等认为确定理想参照系关键指标阈值方法主要有参照法和概率分布法两种^[25]。在此采用概率分布法确定水源涵养参照系。首先依据中国气候分区和植被分布空间数据,获得 175 个气候植被单元(评价单元),再按水源涵养功能从低至高,将水源涵养参照系定义成各评价单元从大到小单位面积水源涵养量累积面积达 10% 时,区域生态系统水源涵养平均值。这样确定主要依据为:(1) 优良生态系统具有较高水源涵养功能;(2) 中国受人为干扰较少的国家级自然保护区总面积约占中国陆地面积的 10%^[26];(3) 在生态系统质量分级评价中,大多将 $\geq 85\%$ 相对生物量或相对覆盖度的生态系统定义为优良生态系统^[27-29],此类生态系统具有较强的生态功能。据欧阳志云等研究表明,2010 年中国森林、灌木和草地优良面积分别约占相应总面积的 5.8%、11.6% 和 5.5%,在 26 个重点水库中无贫营养类型^[30]。2019 年中国优良耕地面积为 0.42 亿 hm^2 ,约占耕地总面积的 31.24%^[31]。因此,除荒漠、城镇及冰川外,中国优良植被生态系统约占中国陆地总面积的 8.0%。鉴于荒漠和城镇系统中亦有一定量的优良生态系统,在此将评价单元优良生态系统面积占比定为 10%。之后利用 Arcmap 空间分析软件获得各评价单元水源涵养参照系阈值。因国家级自然保护区人为干扰较小、主要受气候驱动,在此利用各评价单元内国家级自然保护区平均水源涵养量对水源涵养参照系进行检验。结果表明,评价单元水源涵养参照系与各自国家级自然保护区水源涵养平均值极显著正相关,且斜率达 0.91, $R^2 > 0.78$ (图 2),说明本研究确定的水源涵养参照系较为合理。

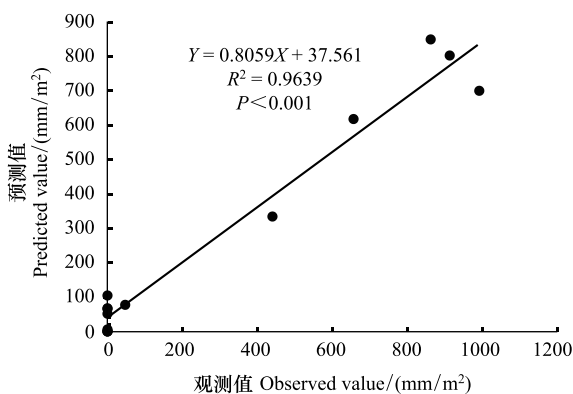


图 1 2010 年水源涵养实测值与拟合值间的相互关系

Fig.1 The correlation between measured water conservation and fitting value in 2010 year

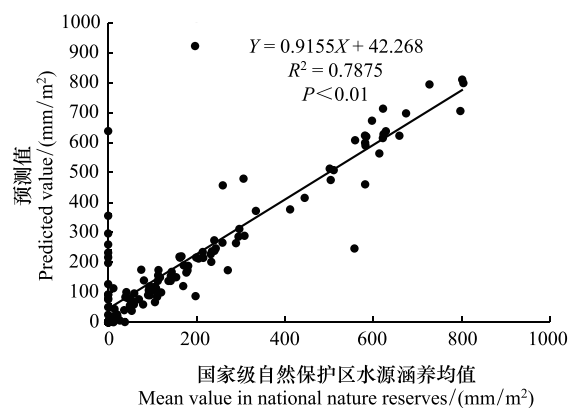


图 2 2018 年评价单元水源涵养参照系与其国家级自然保护区水源涵养平均值的关系

Fig.2 The relationship between the reference value of water conservation and mean water conservation value of national nature reserves of evaluation unit in 2018

1.3 水源涵养功能优劣评价

关于水源涵养优劣评价,目前研究较多依据单位面积水源涵养量分级进行评估^[17-19]。2016 年 13 个部委联合发布的《资源环境承载力监测预警技术方法(试行)》中提出了水源涵养功能指数(单位面积水源涵养量/单位面积降水量 $\times 100$)来评价区域生态系统水源涵养功能高低^[20]。此外,也有基于水源涵养保有率进行水源涵养功能高低评估^[22, 24]。单位面积水源涵养量因区域气候、生态本底、人类活动等差异而不同,致使基于单位面积水源涵养量优劣分级因研究区域不同而不同,至今缺乏基于单位面积水源涵养量的中国生态系统水源涵养优劣评价的报道。《资源环境承载力监测预警技术方法(试行)》中只是简单地将生态系统水源涵养功能分成了高、中、低三级;而基于水源涵养保有率的生态系统水源涵养功能研究还未有水源涵养功能优劣等级划分研究。本研究中基于参照系的水源涵养功能指数 = $100 \times \text{水源涵养量} / \text{水源涵养参照系}$ 。综合国内相关研究结果及中国生态系统水源涵养空间格局,本研究采用以上三种水源涵养功能优劣等级指标的分级标

准详见表 1。

表 1 不同生态系统水源涵养优劣等级指数划分标准

Table 1 Grading standard of different quality indices of ecosystem water conservation

方法序号 Sequence number	名称 Name	优劣等级 Grade of water resource conservation function				
		差 Poor	低 Low	中 Medium	良 Good	优 Excellent
1	基于单位面积水源涵养量的分级/(mm/m ²)	0—50	50—100	100—200	200—600	>600
2	基于水源涵养量/降水量的百分比分级/%	0—5	5—10	10—20	20—40	>40
3	基于参照系的水源涵养功能分级/%	0—5	5—40	40—60	60—85	>85

1.4 数据来源与参数处理

本文用到的气象数据来自中国气象数据网,随后利用彭曼模型核算潜在蒸散量,用克里格空间插值得到年降水量及潜在蒸散量等空间栅格数据;生态系统分布数据来自中国科学院遥感与数字地球研究所;土壤可用水含量根据土壤质地核算获得;90 m 高程数据来自国家地球科学数据中心;土壤数据来为第二次全国土地调查南京土壤所提供的 1:100 万土壤数据;主要数据来源及参数处理详见表 2。

表 2 数据来源与处理方法

Table 2 Sources and treatments of principal data

数据 Data	分辨率 Resolution	来源/处理方法 Data source/treatments
生态系统分布 Ecosystem classification	1 km	中国科学院遥感与数字地球研究所
气象数据 Meteorological data	Excel	中国气象数据网(http://data.cma.cn)
潜在蒸散发 Potential evapotranspiration	Excel	利用气象数据采用彭曼模型核算
高程数据 Digital elevation model data	90 m	国家地球系统科学数据中心
土壤深度 Soil depth	1:100 万	南京土壤所 1:100 万土壤数据
根系深度 Root depth	1 km	根据植被覆被类型查阅先关文献 ^[18—19, 32]
土壤可利用水含量 Soil available water content	1 km	利用土壤质地数据计算 ^[33]
蒸散系数 Evapotranspiration coefficient	1 km	中国科学院遥感与数字地球研究所
平均地表径流系数 Average surface runoff coefficient	1 km	根据土地覆被数据查阅相关文献 ^[13, 20]
国家级自然保护区 National natural reserve	矢量数据	环境保护部南京环境科学研究所
评价单元 Assessment unit	矢量数据	根据植被分布和气候分区数据识别叠加获得

2 结果与讨论

2.1 整体格局与演变

2015 年中国生态系统水源涵养优劣等级以差级别为主体,约占中国陆地种面积的 44.8%,主要分布于西北、青藏高原、华北平原和东北平原等地,中级别次之,约占总量的 17.0%,主要分布于华中南部、华南北部、西南东部和南部、东北东部和北部,以及青藏高原东部地区,随后依次为低、优和良级别类型,分别约占总面积的 15.7%、12.0%和 10.5%,其中低级别类型主要分布于云贵高原、华中及内蒙古东北部等区域,优、良等级主要分布于主要分布于华东和华南,但在青藏高原东部的巴颜喀拉山、秦岭、祁连山、大、小兴安岭、长白山、燕山、阴山和新疆天山等地也有较大面积分布(图 3 和表 3)。

由于年降水量波动变化,尽管中国生态系统水源涵养功能优劣等级空间格局呈波动变化,但依然是水源涵养功能优、良等级主要分布于华东、华南等地,差等级主要分布于西北、华北和东北等地。1990—2018 年中国生态系统水源涵养功能优劣等级整体以差级别为主体,平均约占总面积的 36.4%,中级别次之,约占总量的 22.5%,随后依次为良、优和低级别,平均分别约占总面积的 13.8%、13.6%和 13.5%。回归分析表明,整体中国

生态系统水源涵养功能中等级区域呈极显著降低,而差等级面积显著增加,其余级别面积成无显著规律的波动变化态势(图4)。

表 3 1990—2018 年生态系统水源涵养优劣构成

Table 3 The composition of superior and inferior grades in ecosystem water conservation function 2015

等级 Grades	优 Excelent	良 Good	中 Medium	低 Low	差 Poor
面积 Area/($\times 10^4$ km ²)	112.97	98.54	160.05	147.51	421.02
面积百分比 Area percentage/%	12.02	10.48	17.02	15.69	44.79

2.2 分区格局与演变

由于区域生态系统构成、降雨、温度、光照等自然本底的差异,各气候区生态系统水源涵养功能优劣等级构成差异显著,其中中温带干旱地区、暖温带干旱地区、青藏高原亚寒带半干旱地区、青藏高原寒带干旱地区、青藏高原温带干旱地区、青藏高原温带半干旱地区、暖温带湿润地区、暖温带亚湿润地区、中温带半干旱区、中温带亚湿润地区和青藏高原亚寒带亚湿润地区以差等级占主导,尤其是青藏高原温带干旱地区,几乎全为差级别类型,约占总量的 97%以上。青藏高原温带湿润、亚湿润地区以低级别类型占主导,约占总量的 32%,北亚热带湿润地区、中亚热带湿润地区、寒温带湿润地区、南亚热带湿润地区和热带湿润地区均以中级别类型占比最高。优、良等级之和以南亚热带湿润地区最高,约占总面积的 42%,中亚热带湿润地区次之,约占总面积的 41%,随后是寒温带湿润地区,约占总面积的 40%。各气候区 2015 年生态系统水源涵养功能优劣等级构成详见图 5。

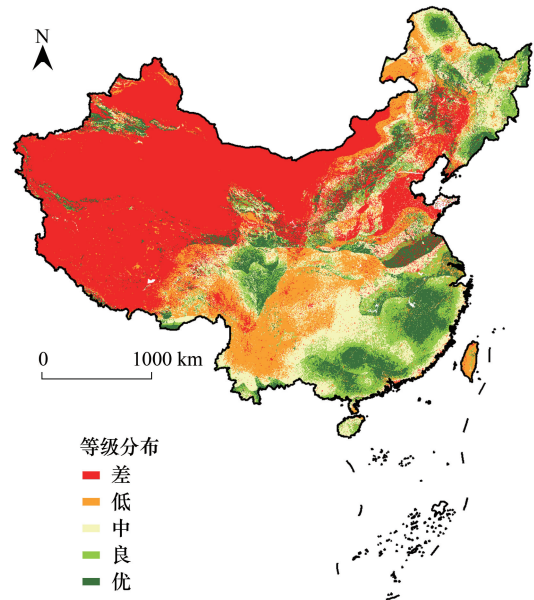


图 3 2015 年生态系统水源涵养功能优劣格局

Fig. 3 The pattern of ecosystem water conservation function in 2015

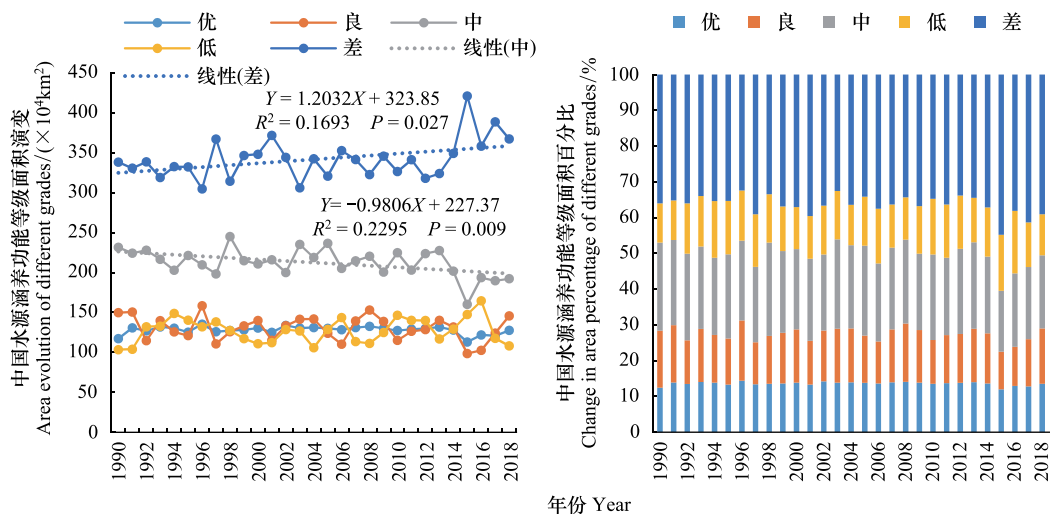


图 4 2000—2018 年中国生态系统水源涵养功能优劣格局

Fig. 4 The pattern of China's ecosystem water conservation function from 2000 to 2018

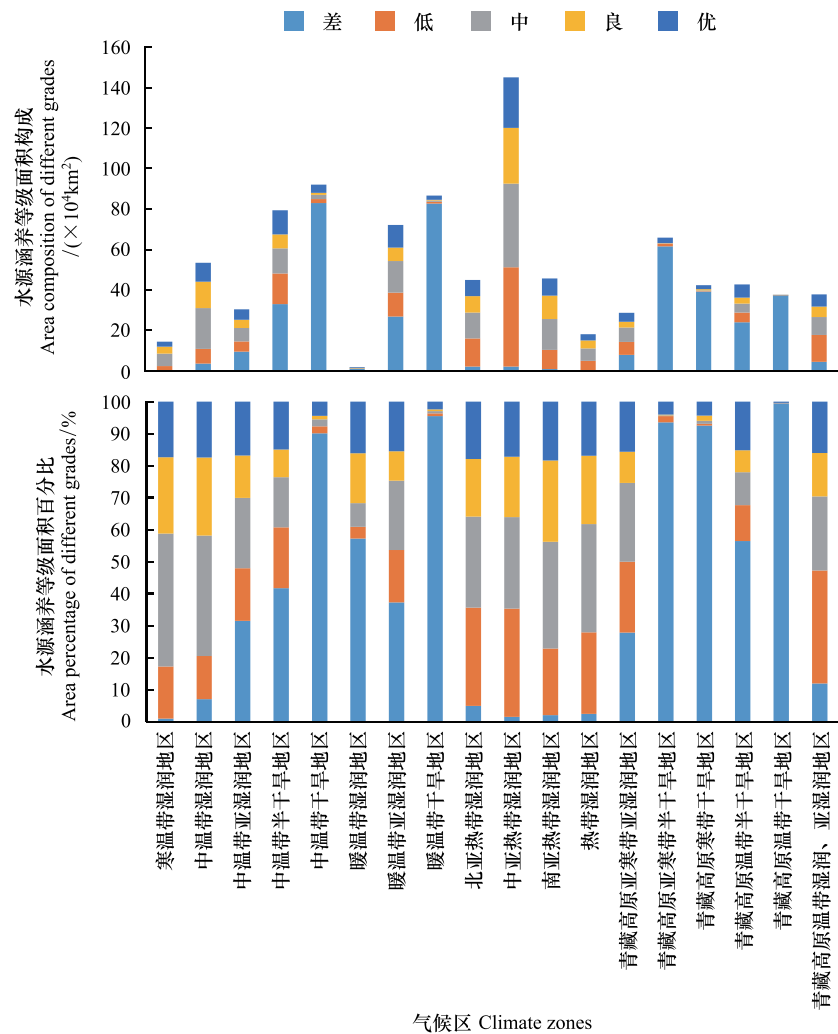


图 5 各气候区水源涵养优劣等级构成

Fig.5 The grade composition of ecosystem water conservation in each climate zones

深入分析发现,1990—2018 年生态系统水源涵养功能不同等级面积变化在气候区间存在显著差异,其中热带湿润地区和青藏高原温带干旱地区生态系统水源涵养功能优级别面积显著降低;暖温带干旱地区良级别面积显著增加,中温带半干旱地区和暖温带亚湿润地区良级别面积分别极显著和显著降低;热带湿润地区、青藏高原温带干旱地区和青藏高原温带湿润、亚湿润地区水源涵养功能中级别面积显著下降;南亚热带湿润地区和热带湿润地区低级别面积显著和极显著增加,青藏高原温带干旱地区低级别面积显著降低;寒温带湿润地区、中温带半干旱地区、北亚热带湿润地区、青藏高原温带干旱地区和青藏高原温带湿润、亚湿润地区差级别面积显著增加,中亚热带湿润地区差级别面积极显著增加,其余气候区生态系统水源涵养功能优劣等级呈无显著规律的波动变化(表 4)。

2.3 基于水源涵养参照系评估的优越性

对比分析基于单位面积水源涵养量、单位面积水源涵养量/年降水量和单位面积水源涵养量/水源涵养参照系评估结果可知,尽管基于单位面积水源涵养量/年降水量获得的生态系统水源涵养功能优劣等级在空间可比性上较基于单位面积水源涵养量评估有一定的提高(东北有较大面积的良好等级分布,西北有较大面积的中等等级分布),但评估结果与基于单位面积水源涵养量的评估结果整体格局变化不大,依然是南高北低、东高西低的分布格局。而基于参照系的中国生态系统水源涵养功能优劣评估结果为:不同优劣等级空间集聚度较

前两种结果显著降低,致使在东北、华北、西北、华南、华东、西南等地均有较大面积生态系统水源涵养功能优良等级分布(图 6)。因此,基于参照系的生态系统水源涵养功能优劣评估在很大程度上解决了空间可比性差的问题,使得研究结果更为科学合理。

表 4 各气候区生态系统水源涵养功能不同优劣等级变化特征

Table 4 The Change characteristics of different levels of ecosystem water conservation function of each climate zone

气候分区 Climate region	优 Excellent	良 Good	中 Medium	低 Low	差 Poor
寒温带湿润地区 Cold temperate humid region	-0.0150	0.1338	-0.2418	0.0089	0.3888 *
中温带湿润地区 Mid-temperate humid region	-0.0967	-0.2025	0.1180	-0.1508	0.0393
中温带亚湿润地区 Mid-temperate subhumid region	-0.1105	0.2882	-0.0310	-0.1365	0.1504
中温带半干旱地区 Mid-temperate semi-arid region	-0.3317	-0.5658 **	-0.3019	0.1692	0.4304 *
中温带干旱地区 Mid-temperate arid region	-0.1501	0.3381	-0.3458	-0.3312	0.3613
暖温带湿润地区 Warm humid region	0.0840	0.3075	-0.2192	0.1533	0.1420
暖温带亚湿润地区 Warm subhumid region	-0.0566	-0.4055 *	-0.2989	-0.0906	0.2617
暖温带干旱地区 Warm semi-arid region	-0.2044	0.4005 *	-0.3594	-0.2733	0.3577
北亚热带湿润地区 Northern subtropical humid region	0.1549	-0.2772	-0.2221	0.0108	0.4590 *
中亚热带湿润地区 Mid-subtropical humid region	-0.0609	-0.3641	-0.2290	0.1280	0.6630 **
南亚热带湿润地区 South subtropical humid region	-0.0203	0.2675	-0.3306	0.4427 *	0.3123
热带湿润地区 Tropical humid region	-0.4407 *	0.1825	-0.4254 *	0.6449 **	0.3555
青藏高原亚寒带亚湿润地区 Subfrigid subhumid region of Tibet Plateau	0.1649	0.0660	-0.1854	-0.3352	0.2062
青藏高原亚寒带半干旱地区 Subfrigid semi-arid region of Tibet Plateau	0.0267	0.0248	-0.0954	0.1586	0.0097
青藏高原寒带干旱地区 Frigid arid region of Tibet Plateau	-0.1222	0.2996	0.0074	-0.0258	0.0808
青藏高原温带半干旱地区 Frigid semi-arid region of Tibet Plateau	-0.0607	-0.2919	-0.2481	-0.3060	0.3559
青藏高原温带干旱地区 Temperate arid region of Tibet Plateau	-0.3774 *	0.3295	-0.4586 *	-0.4134 *	0.4597 *
青藏高原温带湿润、亚湿润地区 Temperate humid and subhumid region of Tibet Plateau	0.0639	-0.3140	-0.3977 *	0.2268	0.3847 *

** $P < 0.01$ 水平极显著相关; * $P < 0.05$ 水平显著相关

基于单位面积水源涵养量的生态系统水源涵养功能优劣评估结果整体呈南高北低、东高西低的分布格局,其原因是基于水量平衡原理得到的单位面积生态系统水源涵养量主要受区域年降水量制约^[13, 34],即年降水量在很大程度上决定了水量平衡得到的区域生态系统水源涵养量。目前,基于水量平衡原理研究全国尺度生态系统水源涵养功能优劣等级的研究还未报道,但区域尺度生态系统水源涵养功能分级/重要性研究不少,如曹叶琳等^[17]陕西省生态系统水源涵养功能评估分析,傅斌等^[18]都江堰市水源涵养功能空间格局,包玉斌等^[19]陕北黄土高原水源涵养功能时空变化研究,上述研究均利用单位面积水源涵养量进行分级获得区域生态系统水源涵养重要性分级(水源涵养优劣等级),其研究结果与本研究基于单位面积水源涵养量的研究结果一致,即区域单位面积水源涵养量愈高,其水源涵养功能愈重要或愈强(水源涵养功能愈优良),反之也愈低,致使区域评价结果空间可比性较低(南方高于北方、东部高于西部),其实质是没有考虑区域气候、植被、土壤等空间异质性的影响。

与其他评价方法相比,基于参照系的生态系统水源涵养功能优劣评估结果空间可比性大大提高,其实质是各评价单元有各自的参比基准,集中体现了分区评价的精髓。因海拔、经度、纬度等地理位置决定了区域气候特征,进而引起植被结构、资源禀赋、人为干扰等空间异质性,致使中国单位面积生态系统水源涵养量呈现南高北低、东高西低的分布格局。因此,简单地根据单位面积生态系统水源涵养量分级,其实质是将全国单位面积最大水源涵养量当做对照基准,其结果必然是缺乏空间可比性。因为中国东西、南北跨度太大,气候、植

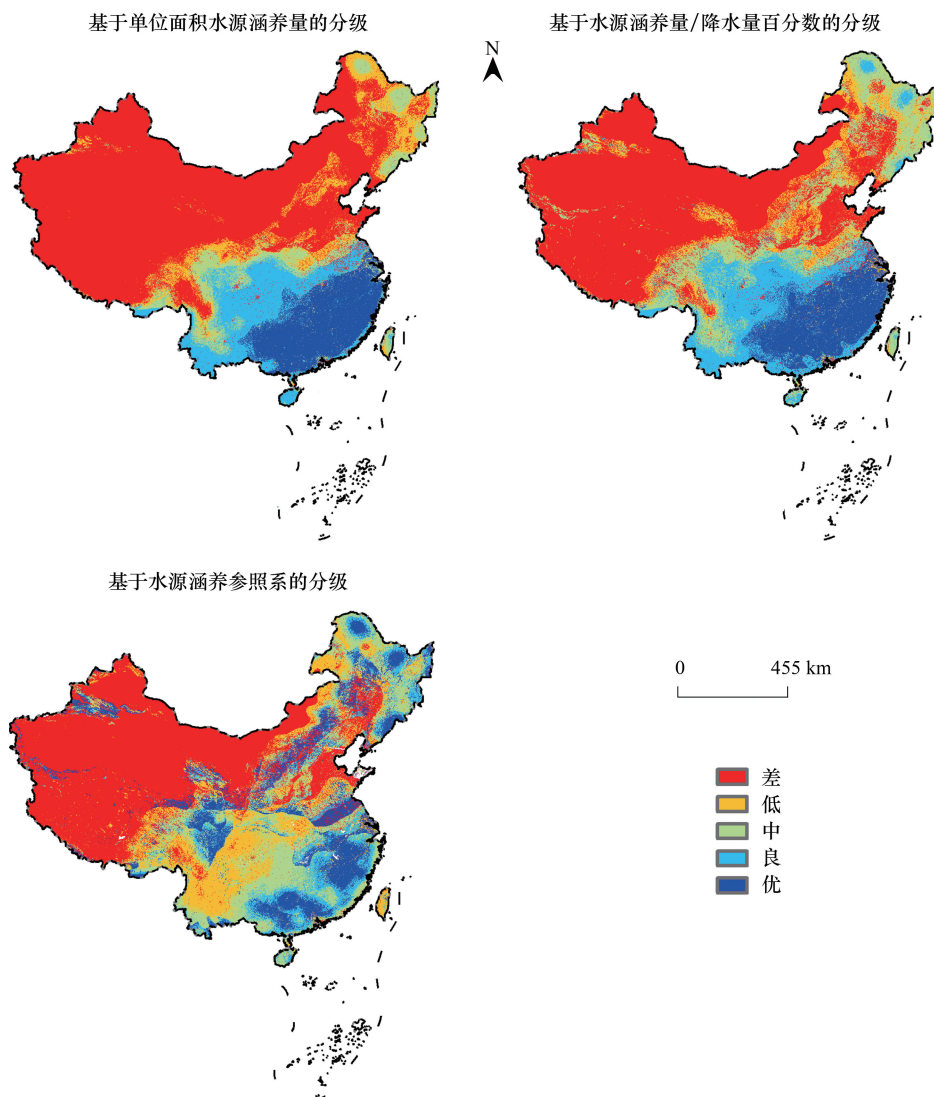


图6 不同评价方法评价结果差异

Fig.6 The differences in the evaluation results of different evaluation methods

被、土壤等空间差异显著。尽管引入年降水量后,评价结果空间可比性有所提高,但由于基于水源平衡法得到的单位面积水源涵养量受区域年降水量的影响更大,致使其评价结果空间可比性仍然较低。由于水源涵养功能优劣和单位面积水源涵养量是两个不同的概念,基于水量平衡获得的单位面积水源涵养量低的区域大多是年降水量低的干旱半干旱地区,其水源涵养功能不一定就弱,即同样是 50 mm/m^2 的水源涵养量,在西北干旱地区,也许就是水源涵养功能优良地区,而在南方可能就是水源涵养低或差等级。单位面积水源涵养功能愈高,水源涵养功能愈强或愈优,这肯定与事实不符,不同区域应有不同阈值或评价标准,即生态系统水源涵养功能优劣评估应分区分类评估。基于此,本研究利用兼顾气候和植被分布的中国 175 个评价单元,再根据概率分布函数,确定各评价单元水源涵养参照系,即确定各评价单元内主要受气候波动驱动的人为干扰较小的气候顶级群落生态系统水源涵养量,之后对水源涵养量/水源涵养参照系 $\times 100$ 进行分级获得栅格尺度生态系统水源涵养功能优劣等级分布。因评估结果是基于区域参照基准做出的,使得各评价单元均有面积不等的各类水源涵养功能等级分布。

关于水源涵养参照系,目前还没有一个公认的统一的概念。但三江源生态保护和建设生态效果评估技术

规范中首次提出了生态系统水源涵养功能保有率的概念^[35],水源涵养功能保有率指被评价区域某类生态系统水源涵养量达到同类最优生态系统水源涵养量的水平,数值上等于评估单元某类生态系统的水源涵养量/评估单元同类最优生态系统的水源涵养量 $\times 100\%$ 。随后吴丹在其博士论文中使用了水源涵养功能保有率^[36],并利用水源涵养保有率对中国草地生态系统、水源涵养型重点生态功能区生态状况进行研究^[22, 24];高吉喜等将其应用于大尺度水源涵养生态保护红线划定研究^[23]。上述研究为水源涵养参照系研究奠定了基础,但在水源涵养参照系概念、确定方法等方面还有待于完善。本研究在提出水源涵养参照系的基础上,提出采用概率分布法确定各评价单元水源涵养参照系阈值,并用评价单元内国家级自然保护区水源涵养平均之进行检验,发现水源涵养参照系与其国家级自然保护区水源涵养平均值极显著正相关,且相关系数 >0.70 ,说明该法确定的水源涵养参照系较科学。之后构建了基于参照系的中国生态系统水源涵养功能指数,并对对比分析不同评估方法研究结果的空间格局差异,结果表明基于水源涵养参照系的中国生态系统水源涵养功能优劣等级评估结果在空间可比性上较其余两种方法结果有显著提高。因此,基于参照系的生态系统水源涵养功能优劣评估方法较其余两种方法在一定程度上解决了空间可比性差的问题,可为区域或全国生态系统建设、保护与管理等部门制订政策提供支撑。

3 结论

基于气象、土地覆被、DEM、土壤及文献等数据,本研究利用水量平衡模型,拟合验证中国生态系统水源涵养量,确定并验证水源涵养参照系,构建基于水源涵养参照系的中国生态系统水源涵养功能优劣评估方法,动态研究 1990—2018 年全国尺度和分区尺度中国水源涵养功能优劣格局与演变规律,对比分析不同水源涵养功能优劣评估方法评估结果差异与原因。得出如下主要结论:

(1) 全国尺度,2015 年中国生态系统水源涵养功能优、良、中、低、差面积占比分别为 12.0%、10.5%、17.0%、15.7% 和 44.8%,以差级别占主导,主要分布于西北、青藏高原、华北平原和东北平原,优良等级主要分布于华东和华南。1990—2018 年中国生态系统水源涵养功能构成演变集中表现为中等级面积显著降低,差等级面积显著增加。

(2) 各气候区生态系统水源涵养优劣等级构成因气候、生态系统构成等差异而不同,一般为气候区愈湿润,优良等级比重愈高,反之,低差等级比重愈高。共有 10 个气候区优、良、中、低、差等级面积在 1990—2018 年间发生显著变化,主要表现为优、良、中以显著降低为主,低和差以显著增加为主。

(3) 由于引入分区分类评估思想,尽管评估结果依然是东部和南部优良等级高于西北和北部地区,但与其他两种方法结果相比,基于水源涵养参照系的生态系统水源涵养功能优劣评估使中国不同等级水源涵养功能空间分布更均匀,增强了中国生态系统水源涵养功能空间可比性,可为相关生态系统建设、保护与管理等部门制定政策提供支撑。

参考文献 (References):

- [1] 谢家泽, 陈志恺. 中国水资源. 地理学报, 1990, 45(2): 210-219.
- [2] 刘世荣, 孙鹏森, 温远光. 中国主要森林生态系统水文功能的比较研究. 植物生态学报, 2003, 27(1): 16-22.
- [3] 李文华, 欧阳志云, 赵景柱. 生态系统服务功能研究. 2002, 北京: 气象出版社.
- [4] Li Y, Wang B, Rao L, Wang Y. Research on water conservation function of typical forests in Jinyun Mountain. Agricultural Science and Technology, 2012. 13(1): 181-188.
- [5] 刘敏超, 李迪强, 温琰茂, 栾晓峰. 三江源地区生态系统水源涵养功能分析及其价值评估. 长江流域资源与环境, 2006, 15(3): 405-408.
- [6] 张彪, 李文华, 谢高地, 肖玉. 北京市森林生态系统的水源涵养功能. 生态学报, 2008, 28(11): 5619-5624.
- [7] 党宏忠, 周泽福, 赵雨森, 杨洪学. 祁连山水源涵养林土壤水文特征研究. 林业科学研究, 2006, 19(1): 39-44.
- [8] 张彪, 王爽, 李庆旭, 谢高地. 京津风沙源治理工程区水源涵养功能时空变化分析. 生态学报, 2021, 41(19): 7530-7541.
- [9] 刘业轩, 石晓丽, 史文娇. 福建省森林生态系统水源涵养服务评估: InVEST 模型与 meta 分析对比. 生态学报, 2021, 41(4): 1349-1361.
- [10] 程唱, 贺康宁, 俞国峰, 柴世秀. 干旱半干旱区不同林型人工林水源涵养能力比较研究. 生态学报, 2021, 41(5): 1979-1990.

- [11] 龚诗涵, 肖洋, 方瑜, 郑华, 肖焱, 欧阳志云. 中国森林生态系统地表径流调节特征. 生态学报, 2016, 36(22): 7472-7478.
- [12] 张彪, 李文华, 谢高地, 肖玉. 森林生态系统的水源涵养功能及其计量方法. 生态学杂志, 2009, 28(3): 529-534.
- [13] 龚诗涵, 肖洋, 郑华, 肖焱, 欧阳志云. 中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素. 生态学报, 2017, 37(7): 2455-2462.
- [14] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿, 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究. 生态学报, 1999, 19(5): 607-613.
- [15] 鲁绍伟, 毛富玲, 靳芳, 余新晓, 饶良懿. 中国森林生态系统水源涵养功能. 水土保持研究, 2005, 12(4): 223-226.
- [16] 王耀, 张昌顺, 刘春兰, 甄霖. 三北防护林体系建设工程区森林水源涵养格局变化研究. 生态学报, 2019, 39(16): 5847-5856.
- [17] 曹叶琳, 宋进喜, 李明月, 王辉源. 陕西省生态系统水源涵养功能评估分析. 水土保持学报, 2020, 34(4): 217-223.
- [18] 傅斌, 徐佩, 王玉宽, 彭怡, 任静. 都江堰市水源涵养功能空间格局. 生态学报, 2013, 33(3): 789-797.
- [19] 包玉斌, 李婷, 柳辉, 马涛, 王怀香, 刘康, 沈茜, 刘心浩. 基于 InVEST 模型的陕北黄土高原水源涵养功能时空变化. 地理研究, 2016, 35(4): 664-676.
- [20] 刘小媛. 基于资源环境承载力评价视角下的县域国土空间规划路径探索[D]. 2019, 西安: 西北大学.
- [21] 文志, 赵赫, 刘磊, 欧阳志云, 郑华, 米红旭, 李彦旻. 土地利用变化对海南土壤水源涵养功能的影响. 应用生态学报, 2017, 28(12): 4025-4033.
- [22] 吴丹, 邹长新, 高吉喜, 林乃峰. 水源涵养型重点生态功能区生态状况变化研究. 环境科学与技术, 2017, 40(1): 174-179.
- [23] 高吉喜, 吴丹, 张琨, 林乃峰, 邹长新. 基于供体受体关系的大尺度水源涵养生态保护红线划定技术方法及应用. 环境生态学, 2019, 1(4): 1-7, 14.
- [24] 吴丹, 邵全琴, 刘纪远, 曹巍. 中国草地生态系统水源涵养服务时空变化. 水土保持研究, 2016, 23(5): 256-260.
- [25] 何念鹏, 徐丽, 何洪林. 生态系统质量评估方法的再思考-理想参照系和关键指标. 生态学报, 2020, 40(6): 1877-1886.
- [26] 范泽孟, 张轩, 李婧, 岳天祥, 刘纪远, 孙晓芳, 香宝, 匡文慧. 国家级自然保护区土地覆盖类型转换趋势. 地理学报, 2012, 67(12): 1623-1633.
- [27] 丁肇慰, 肖能文, 高晓奇, 郑华, 肖焱, 孔令桥, 欧阳志云, 李若男. 长江流域 2000—2015 年生态系统质量及服务变化特征. 环境科学研究, 2020, 33(5): 1308-1314.
- [28] 董天, 肖洋, 张路, 肖焱, 郑华, 欧阳志云. 鄂尔多斯市生态系统格局和质量变化及驱动力. 生态学报, 2019, 39(2): 660-671.
- [29] 肖洋, 欧阳志云, 王莉雁, 饶恩明, 江凌, 张路. 内蒙古生态系统质量空间特征及其驱动力. 生态学报, 2016, 36(19): 6019-6030.
- [30] 欧阳志云, 徐卫华, 肖焱. 中国生态系统格局、质量、服务与演变. 2017, 北京: 科学出版社.
- [31] 2019 年全国耕地质量等级情况公报, 中华人民共和国农业农村部公报, 2020-05-06(4) [2021-10-6]. http://www.moa.gov.cn/nybggh/2020/202004/index_1.htm.
- [32] 游松财, 邸苏闯, 袁晔. 黄土高原地区土壤田间持水量的计算. 自然资源学报, 2009, 24(3): 545-552.
- [33] 周文佐, 刘高焕, 潘剑君. 土壤有效含水量的经验估算研究——以东北黑土为例. 干旱区资源与环境, 2003, 17(4): 88-95.
- [34] Hartanto H, Prabhu R, Widayat A S E, Asdak C. Factors affecting runoff and soil erosion; plot-level soil loss monitoring for assessing sustainability of forest management. Forest Ecology and Management, 2003, 180(1/2/3): 361-374.
- [35] 青海省环境保护厅. 三江源生态保护和建设生态效果评估技术规范: DB 63/T1342—2014. 2014; 青海: 青海省质量技术监督局.
- [36] 吴丹. 中国主要陆地生态系统水源涵养服务研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.