

中国草地生态系统水源涵养服务时空变化

吴丹¹, 邵全琴², 刘纪远², 曹巍²

(1. 环境保护部 南京环境科学研究所, 南京 210042; 2. 中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要:生态系统服务已成为国际上生态学和经济学研究的热点,水源涵养是草地生态系统重要的服务之一,是植被、水与土壤相互作用所产生的综合功能的体现。基于降水贮存量法,利用草地植被覆盖度确定水分调节参数,估算了中国不同区域、不同时段下草地生态系统的水源涵养量。通过前后两个 10 年(20 世纪 80 年代末—2000 年、2000—2010 年)年平均水源涵养量的对比分析,评估中国草地生态系统水源涵养服务功能时空变化。结果表明,前后两个 10 年相比较,我国草地生态系统年平均水源涵养量增加了 22.15 亿 m^3/a ,水源涵养服务功能保有率上升了 4.80%,草地生态系统水源涵养服务功能有所提升。

关键词:生态系统服务; 水源涵养; 降水贮存量法; 草地生态系统

中图分类号:S812

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)05-0256-05

Spatiotemporal Dynamics of Water Regulation Service of Grassland Ecosystem in China

WU Dan¹, SHAO Quanqin², LIU Jiyuan², CAO Wei²

(1. Nanjing Institute of Environmental Sciences, MEP, Nanjing 210042, China;

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Assessment of ecosystem service has become an international hot point of ecology and economics. Water regulation is one of the important services of grassland ecosystem. It is the comprehensive performance of interactions among vegetation, water and soil. We used the rainfall storage capacity method to calculate the water regulation amount of grassland ecosystem in different regions and periods in China based on the grassland vegetation coverage, and evaluated the spatiotemporal dynamics of water regulation service for grassland ecosystem. The following conclusions were obtained. Compared with the first ten years (1980s—2000), the annual mean water regulation amount of grassland ecosystem in China increased by 2.215 billion m^3 per year during the period from 2000 to 2010. At the same time, the water regulation service ratio of grassland ecosystem increased by 4.80%. The water regulation service of grassland ecosystem in China was somewhat improved.

Keywords: ecosystem service; water regulation; rainfall storage capacity method; grassland ecosystem

20 世纪 90 年代以来,生态系统服务已成为当今国际生态学和经济学研究的前言和热点^[1-6]。水源涵养服务是陆地生态系统重要的服务之一,是植被、水与土壤相互作用后所产生的综合功能的体现,主要功能表现在增加可利用水资源、减少土壤侵蚀、调节径流和净化水质 4 个方面^[7-8]。

草地是我国面积最大的生态系统类型,主要分布在年降雨量 400 mm 以下的干旱、半干旱地区,南方和东部湿润半湿润地区的山地,以及东部和南部海岸带。在草地生态系统水源涵养服务研究方面,谢高地

等^[9]参照 Costanza 等提出的方法,在对草地生态系统服务价格根据其生物量修正的基础上,估计了我国各类草地生态系统的各项服务价值。王根绪等^[10]研究发现青藏高原高寒草甸草地植被覆盖度与土壤水分之间具有显著的相关关系。刘军会等^[11]采用降水贮存量法对我国北方农牧交错带的草地生态系统水源涵养量进行了估算。郑淑华等^[12]根据草地地上生物量和草地径流系数的关系,通过降水量与径流系数的乘积估算了北方农牧交错带草地生态系统的涵养水源量。近年来,越来越多的研究关注土地利用/土

收稿日期:2015-10-20

修回日期:2015-10-27

资助项目:国家科技支撑计划项目“国家生态系统观测评估技术系统集成研究与示范”(2013BAC03B00)

第一作者:吴丹(1988—),女,江苏常州人,助理研究员,博士,主要从事生态系统服务研究。E-mail:cumtwudan@163.com

通信作者:邵全琴(1962—),女,江苏常州人,研究员,博士,主要从事生态 GIS 研究。E-mail:shaqqq@lreis.ac.cn

地覆被变化对水文参数的影响^[13-17]。本文以与极度退化状态下的残留植被相比较,草地生态系统涵养水分的增加量作为评估方法,通过估算近 20 a(20 世纪 80 年代末—2010 年)国家、区域尺度草地生态系统的水源涵养量,开展前 10 年和后 10 年水源涵养服务功能变化状况的比较,分析中国草地生态系统水源涵养服务功能的时空变化,有助于提升对生态系统水源涵养服务机理与调控机制的认识,为准确评估草地生态系统水文调节功能和水源涵养服务提供科学依据。

1 研究方法 with 数据处理

1.1 研究方法

本文以降水贮存量法估算我国草地生态系统的水源涵养量,该方法以生态系统的水文调节效应来衡量其涵养水分的能力^[18],用公式可表示为:

$$Q = A \cdot J \cdot R \quad (1)$$

$$J = J_0 \cdot K \quad (2)$$

$$R = R_0 - R_g \quad (3)$$

式中: Q 为与裸地相比较,草地生态系统涵养水分的增加量; A 为草地生态系统面积; J 为研究区产流降水量; J_0 为研究区降水量; K 为产流降雨量占降雨总量的比例; R 为与裸地相比较,草地生态系统减少径流的效益系数; R_0 为产流降雨条件下裸地降雨径流率; R_g 为产流降雨条件下草地生态系统降雨径流率。

本文认为,在一定的气候条件下,自然植被在极度退化状态下也会保留一定的覆盖度,不会完全退化至纯裸地,因此上式中裸地降雨径流率用极度退化下残留植被的降雨径流率代替。

为消除年际间降水波动对模拟结果的影响,本文定义了草地生态系统水源涵养服务功能保有率,其结果集中体现了草地生态系统由于自身变化导致的服务功能的变化。

草地生态系统水源涵养服务功能保有率计算公式可以表达为:

$$WP_{ik} = \frac{W_{ik}}{WG_{ik}} \quad (4)$$

式中: WP_{ik} 为第 i 年第 k 个栅格的草地生态系统水源涵养服务功能保有率; W_{ik} 为第 i 年第 k 个栅格的草地生态系统水源涵养量; WG_{ik} 为第 i 年第 k 个栅格草地植被覆盖度为 100%(假设量)的水源涵养量。

1.2 数据来源与处理

1.2.1 数据来源 全国 1 km 栅格百分比土地覆被数据集(1980s、2000 年、2010 年)由中国科学院地理科学与资源研究所提供。气象站点降水观测数据来源于中国

气象科学数据共享服务网。中国逐日格点降水数据集(1990—2010 年)由国家气象信息中心提供^[19]。1990—2000 年 NOAA/AVHRR 1 km 16 d 最大合成 NDVI 及 2000—2010 年 MODIS 1 km 16 d 最大合成 NDVI 数据由中国科学院地理科学与资源研究所提供。

1.2.2 参数获取

(1) 年降水量。本文首先通过中国地区 756 个气象站点的月降水资料,采用基于薄片样条理论的 ANUSPLIN 方法^[20-21]进行空间插值,生成了 1990—2010 年全国 1 km 逐月降水数据集。该方法在空间插值过程中考虑了地形因子的影响,能够表达一定的空间异质性;但由于未考虑周边国际气象台站的数据,边界处插值结果偏低(附图 10)。本文将 ANUSPLIN 插值结果与国家气象信息中心提供的 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 日值降水格点数据结合,以每个格点降水量纠正控制 ANUSPLIN 插值结果的总量,同时保留 ANUSPLIN 插值数据中的空间差异,生成了 1990—2010 年全国 1 km 逐月降水数据集。

(2) 产流降雨量占降雨总量的比例(K 值)。产流降雨量是指发生产流的降雨量总和。自然降雨中的小降雨次数频繁,而这些小降雨事件多半不产生径流,在计算产流降雨量时如果将不产生地表径流的降雨剔除掉,不但会大大减少工作量,而且会提高计算精度。

通过搜集已公开发表文献中的实测降雨产流临界值^[22-30],根据点位信息,以临近国家气象台站实测日降水数据修正同时期热带降雨测量卫星(Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM)提供的逐日 3 h 降水量数据,累积单次降雨量大于降雨产流临界值的数值,得到单点产流降雨量占降雨总量的比例(K 值)。本文扫描并数字化了多年均河川径流系数等值线,并进行了空间插值,将上述 K 值与该点径流系数建立线性关系,相关系数高达 0.8 以上(图 1)。通过该线性关系,基于径流系数图即可得到产流降雨量占降雨总量比例的空间分布(附图 11)。

(3) 降雨径流率。草地生态系统降雨径流率 R_g 通过草地植被覆盖度 f_c 计算得到^[31]:

$$R_g = -0.3187f_c + 0.36403 \quad (5)$$

青藏高原区的高寒草甸是发育在高原和高山上的一种非地带性草地类型。其土壤表层有厚约 3—10 cm 的草皮,根系交织似毡,软韧而具弹性,具有良好的涵养水源能力。不同植被覆盖度下高寒草甸的降水产流特征采用李元寿等^[32]在长江和黄河源区的研究结果。

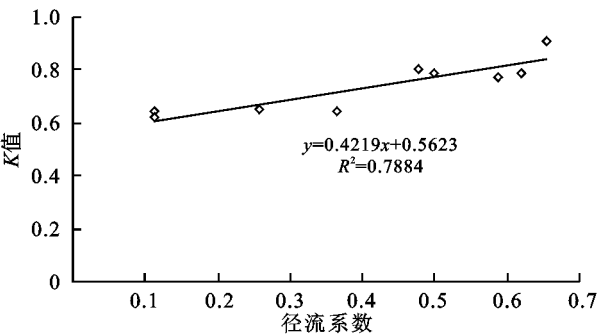


图 1 径流系数与 K 值关系

(4) 植被覆盖度。植被覆盖度通过归一化植被指数(NDVI)估算：

f_c = (NDVI - NDVI_min) / (NDVI_max - NDVI_min) (6)

式中：NDVI 为各像元的 NDVI 值；NDVI_{max}，NDVI_{min} 分别表示区域内最大和最小的 NDVI 值。

本文利用 1990—2000 年 NOAA/AVHRR 1 km 16 d 最大合成 NDVI 数据产品,以及 2000—2010 年 MODIS 1 km 16 d 最大合成 NDVI 数据产品计算植被覆盖度。由于 NOAA/AVHRR 和 MODIS 数据由不同的卫星传感器观测得到,它们的辐照强度具有一定差异。为了保证 AVHRR NDVI 和 MODIS NDVI 数据具有一致可比性,本文以 2000 年——对应的 24 期栅格值通过线性回归的方法进行拟合,建立一元线性关系,对 AVHRR NDVI 数据进行了校正,得到 1990—2010 年长时间序列植被覆盖度数据集。

不同地区生态系统由于所处气候条件、水热环境等方面的差异,在极度退化状况下的植被覆盖度也是有差异的。本文以中国科学院中国生态系统研究网络(CERN)提供的生态分区作为基础分区数据,根据统计各生态分区中 1990—2010 年每 16 d 的最低植被覆盖度(直方统计图低值端 5%处的值)取平均,得到极度退化状态下的残留植被覆盖度,用于计算残留植被的降雨径流率。

2 结果与分析

2.1 草地生态系统水源涵养量时空变化

20 世纪 80 年代末—2000 年,我国草地生态系统年平均水源涵养量为 1 161.66 亿 m³/a;2000—2010 年,我国草地生态系统年平均水源涵养量为 1 183.81 亿 m³/a,增加了 22.15 亿 m³/a。

前后两个 10 年相比较,西北区草地生态系统水源涵养量明显上升,物质量增加了 39.18 亿 m³/a,变化率为 14.43%;西南区草地生态系统水源涵养量基本持衡,物质量增加了 0.57 亿 m³/a,变化率为 0.10%;华中区、华北区和华南区草地生态系统水源涵养量轻微下降,物质量分别减少了 1.10、2.45、3.10 亿 m³/a,变化率分别为-2.90%,-3.08%,-4.71%;华东区和东北区草地生态系统水源涵养量较明显下降,物质量分别减少了 8.85、2.10 亿 m³/a,变化率分别为-7.80%和-9.01%(表 1,附图 12—13)。

表 1 中国分区草地生态系统年平均水源涵养量变化

分区	前 10 a 年平均水源涵养量/ (亿 m ³ · a ⁻¹)	后 10 a 年平均水源涵养量/ (亿 m ³ · a ⁻¹)	变化量/ (亿 m ³ · a ⁻¹)	变化 率/%	变化 程度
西南区	569.84	570.41	0.57	0.10	基本持衡
华北区	79.75	77.30	-2.45	-3.08	轻微下降
东北区	23.35	21.24	-2.10	-9.01	较明显下降
西北区	271.56	310.74	39.18	14.43	明显上升
华东区	113.41	104.56	-8.85	-7.80	较明显下降
华南区	65.74	62.64	-3.10	-4.71	轻微下降
华中区	38.01	36.91	-1.10	-2.90	轻微下降
合计	1161.66	1183.81	22.15	1.91	轻微上升

注:变化程度依据变化率划分为:明显下降(<-10%)、较明显下降(-5%~-10%)、轻微下降(-1%~-5%)、基本持衡(-1%~1%)、轻微上升(1%~5%)、较明显上升(5%~10%)、明显上升(>10%),下表同。

2.2 水源涵养服务功能保有率时空变化

20 世纪 80 年代末—2000 年,我国草地生态系统水源涵养服务功能保有率为 0.28;2000—2010 年,我国草地生态系统水源涵养服务功能保有率为 0.30,增加了 4.80%。前后两个 10 年相比较,我国草地生态系统水源涵养服务功能保有率以提升为主,华北区表现为明显上升,东北区和西北区表现为较明显上升,其他区域则表现为轻微上升;主要原因是各区草地植被覆

盖度后 10 年较前 10 年均有所增加(表 2,图 2)。

从空间分布上看(附图 14—15),内蒙呼伦贝尔市西部和锡林郭勒盟西南部、四川盆地周边、云南、贵州等地草地生态系统水源涵养服务功能有所下降;青藏高原区和黄土高原区草地生态系统水源涵养服务功能提升明显,其中黄土区水源涵养服务功能保有率升幅达 12.09%,体现了退耕还草工程的实施在黄土高原地区取得了明显的生态成效。

表 2 中国分区草地生态系统水源涵养服务功能保有率变化

分区	前 10 年(1980s—2000 年)	后 10 年(2000—2010 年)	变化量	变化率/%	变化程度
西南区	0.31	0.31	0.01	2.02	轻微上升
华北区	0.20	0.23	0.02	10.95	明显上升
东北区	0.39	0.42	0.03	7.71	较明显上升
西北区	0.27	0.28	0.02	5.93	较明显上升
华东区	0.65	0.66	0.01	1.39	轻微上升
华南区	0.70	0.72	0.02	2.79	轻微上升
华中区	0.62	0.63	0.01	1.59	轻微上升
全国	0.28	0.30	0.01	4.80	轻微上升

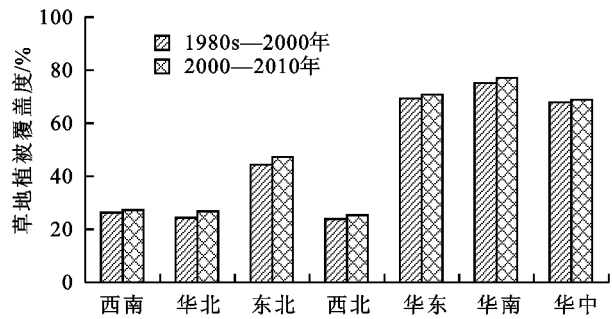


图 2 前后两个 10 年草地植被覆盖度

3 结论与讨论

目前,采用降水贮存量法评估陆地生态系统水源涵养服务的研究较少,有些研究通过该方法估算森林、草地生态系统的水源涵养量进而估算其服务价值,但是文中没有给出具体水源涵养量的数值^[11,33-34]。本文通过改进降水贮存量法的各项参数,估算了 20 世纪 80 年代末以来我国草地生态系统的水源涵养量。结果表明,2000—2010 年,我国草地生态系统年平均水源涵养量比前 10 年增加了 22.15 亿 m³/a。草地生态系统水源涵养服务功能保有率以提升为主,主要是由于各区草地植被覆盖度后 10 年较前 10 年均有所增加。水源涵养服务功能保有率消除了年际间降水波动对模拟结果的影响,其结果集中体现了生态系统由于自身变化导致的服务功能的变化。

生态系统水源涵养服务的发挥与气候、土壤、植被、地形地貌等因素密切相关,是一个极其复杂的综合调控过程。生态工程的实施对我国草地生态系统水源涵养服务功能的恢复与提升发挥了积极作用,这种作用在黄土区表现得尤为明显。西部地区生态环境较为脆弱,应加强生态保护与生态恢复建设,保护重要河流上游和重要水源补给区植被,不断恢复并扩大草地生态系统的水源涵养空间,充分发挥和提升自然生态系统水源涵养服务效益。

气候变化和人类活动是影响草地生态系统水源涵养服务的两大驱动因素,如何量化区分两者对生态系统水源涵养服务的相对贡献,对未来气候变化、不

同土地利用方式、强度下的生态系统水源涵养服务进行模拟,从而有效指导合理的人类活动,有待进一步深入研究。

参考文献:

[1] Costanza R, d'Arge R, De Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997,387(6630):253-260.

[2] Daily G C. Management objectives for the protection of ecosystem services[J]. Environmental Science & Policy, 2000,3(6):333-339.

[3] De Groot R S, Wilson M A, Boumans R M J. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services[J]. Ecological Economics, 2002,41(3):393-408.

[4] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-being[M]. Washington DC: Island Press, 2003.

[5] Wallace K J. Classification of ecosystem services: problems and solutions[J]. Biological Conservation, 2007, 139(3):235-246.

[6] Fu B, Wang S, Su C, et al. Linking ecosystem processes and ecosystem services[J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2013,5(1):4-10.

[7] Brauman K A, Daily G C, Duarte T K, et al. The nature and value of ecosystem services: an overview highlighting hydrologic services[J]. Annual Review of Environment and Resources, 2007,32:67-98.

[8] Vigerstol K L, Aukema J E. A comparison of tools for modeling freshwater ecosystem services[J]. Journal of Environmental Management, 2011,92(10):2403-2409.

[9] 谢高地,张德镗,鲁春霞,等. 中国自然草地生态系统服务价值[J]. 自然资源学报,2001,16(1):47-53.

[10] 王根绪,沈永平,钱翰,等. 高寒草地植被覆盖变化对土壤水分循环影响研究[J]. 冰川冻土,2003,25(6):653-659.

[11] 刘军会,高吉喜. 北方农牧交错带生态系统服务价值测算及变化[J]. 山地学报,2008,26(2):145-153.

[12] 郑淑华,王堃,赵萌莉,等. 北方农牧交错区草地生态系统服务间接价值的初步评估[J]. 草业科学,2009,6(9):18-23.

[13] Van Dijk A I, Keenan R J. Planted forests and water

- in perspective[J]. *Forest Ecology and Management*, 2007, 251(1):1-9.
- [14] Jin T T, Fu B J, Liu G H, et al. Hydrologic feasibility of artificial forestation in the semi-arid Loess Plateau of China [J]. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2011, 8(1):653-680.
- [15] Feng X M, Sun G, Fu B J, et al. Regional effects of vegetation restoration on water yield across the Loess Plateau, China [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16(8):2617-2628.
- [16] Dodds W K, Perkin J S, Gerken J E. Human impact on freshwater ecosystem services: A global perspective [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(16):9061-9068.
- [17] Su C, Fu B. Evolution of ecosystem services in the Chinese Loess Plateau under climatic and land use changes[J]. *Global & Planetary Change*, 2013, 101(1):119-128.
- [18] 赵同谦, 欧阳志云, 郑华. 中国森林生态系统服务功能及其价值评价[J]. *自然资源学报*, 2004, 19(4):480-491.
- [19] 沈艳, 冯明农, 张洪政, 等. 我国逐日降水量格点化方法[J]. *应用气象学报*, 2010, 21(3):279-286.
- [20] Hutchinson M F. Interpolating mean rainfall using thin plate smoothing splines[J]. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1995, 9(4):385-403.
- [21] Apaydin H, Sonmez F K, Yildirim Y E. Spatial interpolation techniques for climate data in the GAP region in Turkey[J]. *Climate Research*, 2004, 28(1):31-40.
- [22] 张建军, 朱金兆, 魏天兴. 晋西黄土区坡面水土保持林地产流产沙的观测分析[J]. *北京林业大学学报*, 1996, 8(3):14-20.
- [23] 杨海军, 孙立达, 余新晓. 晋西黄土区水土保持林水量平衡的研究[J]. *北京林业大学学报*, 1993, 15(3):42-50.
- [24] 方向京, 孟广涛, 郎南军, 等. 滇中高原山地人工群落径流规律的研究[J]. *水土保持学报*, 2001, 15(1):66-84.
- [25] 杨芳, 王克勤, 延红卫. 尖山河流域不同植被类型坡面产流产沙量研究[J]. *林业调查规划*, 2009, 34(1):10-14.
- [26] 黄承标, 文受春. 里骆林区常绿阔叶林和人工杉木林气候水文效应[J]. *生态学杂志*, 1993, 12(3):1-7.
- [27] 王金叶, 李海防, 段文军, 等. 漓江上游降水特征及典型森林群落地表径流规律的研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2012, 32(6):72-77.
- [28] 郑郁善, 陈卓梅, 邱尔发, 等. 不同经营措施笋用麻竹人工林的地表径流研究[J]. *生态学报*, 2003, 23(11):2387-2395.
- [29] 薛立, 薛晔, 郑卫国, 等. 佛山市湿地松林地地表径流中可溶性氮和磷的流失特征[J]. *水土保持通报*, 2010, 30(1):31-34.
- [30] 申卫军, 周国逸, 彭少麟, 等. 南亚热带鹤山 5 种生态系统的地表径流[J]. *热带亚热带植物学报*, 1999, 7(4):273-281.
- [31] 朱连奇, 许叔明, 陈沛云. 山区土地利用/覆被变化对土壤侵蚀的影响[J]. *地理研究*, 2003, 22(4):432-438.
- [32] 李元寿, 王根绪, 王一博, 等. 长江黄河源区覆被变化下降水的产流产沙效应研究[J]. *水科学进展*, 2006, 17(5):616-623.
- [33] 姜立鹏, 覃志豪, 谢雯, 等. 中国草地生态系统服务功能价值遥感估算研究[J]. *自然资源学报*, 2007, 22(2):161-170.
- [34] 方瑜, 欧阳志云, 肖燧, 等. 海河流域草地生态系统服务功能及其价值评估[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(10):1694-1706.

~~~~~

(上接第 255 页)

- [9] 曾丽红, 宋开山, 张柏, 等. 近 60 年来东北地区参考作物蒸散量时空变化[J]. *水科学进展*, 2010, 21(2):194-200.
- [10] 曹雯, 申双和, 段春锋. 西北地区近 49 年生长季参考作物蒸散量的敏感性分析[J]. *中国农业气象*, 2011, 32(3):375-381.
- [11] 吴文玉, 孔芹芹, 王晓东, 等. 安徽省近 40 年参考作物蒸散量的敏感性分析[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(7):1160-1166.
- [12] 唐湘玲, 刘月兰, 魏文寿. 石河子地区近 46 年来积温变化趋势特征研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2009, 23(11):83-87.
- [13] 胡汝骥, 樊自立, 王亚俊, 等. 近 50 a 新疆气候变化对环境的影响评估[J]. *干旱区地理*, 2001, 24(2):97-103.
- [14] 尹鹤, 吴绍洪, 戴尔阜. 1971—2008 年我国潜在蒸散时空演变的归因[J]. *科学通报*, 2010, 55(22):2226-2234.
- [15] 符淙斌, 王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. *大气科学*, 1992, 16(4):482-493.
- [16] 赵传成, 王雁, 丁永建, 等. 西北地区近 50 年气温及降水的时空变化[J]. *高原气象*, 2011, 30(2):385-390.
- [17] 张山清, 普宗朝. 新疆参考作物蒸散量时空变化分析[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(5):73-79.
- [18] 普宗朝, 张山清. 近 48 年新疆夏半年参考作物蒸散量时空变化[J]. *中国农业气象*, 2011, 32(1):67-72.
- [19] 吴燕锋, 巴特尔·巴克, 李维, 等. 基于 CI 指数石河子农垦区干湿变化特征[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(36):247-252.
- [20] 吴燕锋, 巴特尔·巴克, 李维, 等. 近 52 a 石河子地区 ET<sub>0</sub> 变化特征[J]. *灌溉排水学报*, 2015, 34(1):69-74.