

DOI: 10.20103/j.stxb.202403150537

胡金虎, 丁建丽, 张子鹏, 王娇, 刘景明. 近 30 年吐鲁番哈密地区植被生态需水估算. 生态学报, 2024, 44(19): 8699-8715.

Hu J H, Ding J L, Zhang Z P, Wang J, Liu J M. Estimation of vegetation ecological water demand in Tuha area in the past 30 years. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(19): 8699-8715.

近 30 年吐鲁番哈密地区植被生态需水估算

胡金虎^{1,2,3}, 丁建丽^{1,2,3,*}, 张子鹏^{1,2,3}, 王 娇^{1,2,3}, 刘景明^{1,2,3}

1 新疆大学地理与遥感科学学院, 乌鲁木齐 830046

2 新疆绿洲生态自治区重点实验室, 乌鲁木齐 830046

3 新疆智慧城市与环境建模自治区普通高校重点实验室, 乌鲁木齐 830046

摘要:新疆吐鲁番哈密地区(简称“吐哈地区”)属极端干旱区,光照时间长、昼夜温差大,生态环境脆弱,生态环境问题尤为突出,水资源有效利用对生态环境保护具有重要作用。吐哈地区植被生态需水在总需水量中占据显著比重,对于维护区域生态平衡和可持续发展具有重要意义。基于生态保护重要性分级,统计研究区总植被面积与各生态保护等级区植被面积,分别采用改进的彭曼公式法、潜水蒸散发法与生态分区综合计算法估算 1990—2020 年吐哈地区不同生态保护等级的植被生态需水量。结果表明:(1)三种方法估算的吐哈地区总植被生态需水量在 1990—2020 年期间呈现波动变化,改进的彭曼公式法估算结果由 50.18 亿 m³变化到 57.8 亿 m³,潜水蒸散发法估算结果由 54.42 亿 m³变化到 51.85 亿 m³,生态分区估算结果由 45.58 亿 m³变化到 52.03 亿 m³。(2)极重要生态保护等级区的近 30 年植被需水量在三种估算方法下均增长,其中改进的彭曼公式法估算结果增长最大,由 12.12 亿 m³增长到 18.54 亿 m³。(3)对比三种植被生态需水估算方法,1990—2020 年每 5 年期间估算的植被生态需水总量变化趋势基本一致,每种方法估算的相应生态保护等级区内植被生态需水量变化趋势一致,说明生态分区估算植被生态需水量的方法是合理的,可为植被生态需水的估算提供参考。

关键词:生态保护等级;生态区;植被生态需水;改进的彭曼公式;潜水蒸散发

Estimation of vegetation ecological water demand in Tuha area in the past 30 years

HU Jinhu^{1,2,3}, DING Jianli^{1,2,3,*}, ZHANG Zipeng^{1,2,3}, WANG Jiao^{1,2,3}, LIU Jingming^{1,2,3}

1 College of Geography and Remote Sensing, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

2 Key Laboratory of Xinjiang Oasis Ecological Autonomous Region, Urumqi 830046, China

3 Key Laboratory of Smart City and Environment Modelling of Higher Education Institute, Urumqi 830046, China

Abstract: The Turpan-Hami region in Xinjiang, commonly referred to as the “Tuha region”, is renowned for its severe arid conditions, prolonged sunshine hours, significant diurnal temperature fluctuations, and a delicate ecological balance. Consequently, the ecological and environmental concerns loom large in this region, where the judicious utilization of water resources holds the key to safeguarding its ecological integrity. Vegetation ecological water demand constitutes a significant chunk of the overall water demand in the Tuha region, crucial for maintaining regional ecological stability and fostering sustainable development. This study, premised on the classification of ecological protection importance, delved into the analysis of the total vegetation area and the specific vegetation area within each ecological protection grade in the study area. Three methods—the modified Penman formula method, the phreatic evaporation method, and the ecological zoning comprehensive calculation method—were deployed to estimate the vegetation ecological water demand in various ecological protection grades in the Tuha region from 1990 to 2020. The findings revealed that: (1) The total vegetation ecological

基金项目:天山创新团队(2022TSYCTD0001);科技部基础资源调查项目(2021XJKK10001);自治区自然科学基金重点项目(2021D01D06)

收稿日期:2024-03-15; 网络出版日期:2024-07-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: watarid@xju.edu.cn

water demand in the Tuha region, estimated using the trio of methods, exhibited fluctuations during 1990—2020. Precisely, the modified Penman method pegged it at a range from 5.018 billion cubic meters to 5.78 billion cubic meters, the phreatic evaporation method estimated it to be between 5.442 billion cubic meters and 5.185 billion cubic meters, while the ecological zoning method arrived at a range of 4.558 billion cubic meters to 5.203 billion cubic meters. (2) Using all three estimation methods, it was observed that the vegetation water demand in the areas designated as extremely important for ecological protection had increased over the past 30 years. Notably, the modified Penman formula method revealed the most pronounced increase, escalating from 1.212 billion cubic meters to 1.854 billion cubic meters. (3) A comparison of the three estimation methods revealed consistent trends in the estimated total vegetation ecological water demand every five years from 1990 to 2020. Similarly, the trends in vegetation ecological water demand within corresponding ecological protection grade areas estimated by each method were also consistent. This indicates the reasonableness of the ecological zoning method for estimating vegetation ecological water demand, providing a valuable reference for future estimations.

Key Words: ecological protection level; ecological region; ecological water requirement of vegetation; improved Penman formula; diving evapotranspiration

新疆维吾尔自治区全境位于干旱半干旱区,气候干燥少雨,风大沙多,蒸散发作用强烈,水资源先天匮乏且分布不均匀^[1-2]。吐哈地区又是全疆水资源最紧缺的地区,水资源时空分布不均,资源型、工程型、结构型及管理型等多重缺水问题并存^[3]。植被是生态系统的重要组成部分,植被生长必然消耗一定的水资源,其需水量由于植被类型、生长状况差异等而呈现出时空变化差异^[4]。研究植被生态需水量的时空变化对区域水资源规划和管理、灌溉调度、植被恢复等方面具有重要意义^[5]。

植被生态需水是指为保障植被能正常生长、发育或植被生态系统维持健康并发挥正常生态系统服务功能而需要消耗的最低水量,被认为是退化生态系统恢复与重建的关键^[6-7]。植被生态需水的研究早在 19 世纪初,用于观测农作物的需水量两种简易方法-简测法与田测法,已在美、英、法、俄、日等多国出现,并被初步使用^[8-9]。20 世纪 90 年代,我国开始关注植被生态系统的需水问题,主要集中在西北干旱缺水地区。1995 年,汤奇成等^[10]计算了新疆绿洲生态环境需水量,在计算过程中将环境系统分为了天然生态系统和人工生态系统。1999 年,Crawford 等^[11]根据不同类型生态系统的功能,探讨了植物与水文过程之间的关系,指出水作为环境因子对自然恢复和保护起着巨大作用。2000 年,贾宝全等^[12]依据部分代表地区的试验资料及相关理论公式确定了新疆各类型生态用水的需水定额量,用面积定额法初步估算了 1995 年新疆的生态用水总量。2008 年,Groeneveld 等^[13]使用遥感数据计算出植被的 NDVI 值,并结合不同植被的潜在蒸腾量与年降雨量,通过三者的相互关系计算了植被生态需水量。同年陈亚宁等^[14]使用潜水蒸发估算塔里木河维护天然植被的生态需水。2012 年李卫红等^[15]采用蒸发系数法和定额法估算了开都-孔雀河流域绿洲自然生态系统和社会经济系统综合需水量。2018 年 Chi 等^[16]利用 GIS 和遥感技术动态计算额尔古纳河流域范围内的植被系数和土壤影响系数,对彭曼公式进行了修正,精准估算了当地针叶林、阔叶林、草原和草甸四种天然植被的生态需水量和生态缺水量。2020 年,马玉其等^[17]在新疆开都—孔雀河流域天然植被生态需水量研究估算中采用了潜水蒸发法并引入了生态红线与生态敏感区。以上对于干旱区植被生态需水量的估算方法,大多学者都采用潜水蒸发法或改进的彭曼公式法。

此外,对于吐哈地区植被生态需水也存在研究。2007 年,包安明等^[18]对新疆哈密地区采用 RS 技术计算分区生态环境植被生态需水量。2021 年,徐建华等^[19]将新疆按区域进行划分,采用面积定额法与改进的彭曼公式法计算得到 2000—2018 年吐哈地区植被生态需水量。同年张爱民等^[20]采用 Penman-Monteith 法生态需水定额和卫星遥感面积识别及水文年内展布方法,分析评估吐鲁番市白杨河流域内上下游绿洲生态环境植被需水量。2023 年郝天鹏等^[21]分析了吐鲁番艾丁湖流域与哈密巴里坤-伊吾盆地河区的植被生态耗水强度及需水量。然而以上研究中仅仅只是对吐哈地区部分区域或流域的植被生态需水量估算,并未对吐哈全区域植被生态需水进行计算。此外这些研究中计算的只是某一年内植被生态需水量,未对其年际变化进行长时间

序列的研究,无法体现该区域植被生态需水量的变化趋势。在计算方法方面,以往研究是采用一种或多种方法对全区域进行估算,并未考虑到方法适用性。

在此背景下,考虑了改进的彭曼公式与潜水蒸散法的适用性,将研究区进行生态分区,遵从不同生态区有不同生态类型与降水条件的原则,采取不同生态分区分别使用改进的彭曼公式与潜水蒸散法计算吐哈地区植被生态需水量,对比全区域只采用改进的彭曼公式法或潜水蒸散法估算吐哈地区植被生态需水量结果,验证生态分区估算方法的合理性。为了水资源合理分配调用,研究将研究区按生态保护重要性等级进行分级,估算出不同生态保护等级区近 30 年植被生态需水量,对不同生态保护等级植被生态需水量进行长时间序列分析,为当地政府制定调水规划安排提供借鉴。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

吐哈地区是吐鲁番凹陷(即吐鲁番市)和哈密凹陷(即哈密市)的统称($41^{\circ}18'—43^{\circ}43' N, 86^{\circ}40'—96^{\circ}04' E$)面积约 $2.1 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。吐哈盆地气候干燥,水资源匮乏,地下水严重超采,用水矛盾十分突出,水资源短缺成为制约吐哈地区高质量发展的短板和瓶颈。该地区属于典型的干旱区,生态系统脆弱区,水资源缺乏,植被稀疏,也是生态环境问题敏感区(图 1)。



图 1 吐哈地区示意图

Fig.1 Schematic map of the Tuha region

1.2 研究方法

1.2.1 生态保护分级与生态分区

生态保护分级是表示生态结构的合理程度和生态功能的完整程度,包括了生态服务功能重要性和生态环境敏感性^[22-23]。从中国生态系统评估与生态安全数据库(<https://ecosystem.csdb.cn/index.jsp>)获取中国生态系统敏感性(冻融侵蚀敏感性、沙漠化敏感性、盐渍化敏感性、石漠化敏感性、土壤侵蚀敏感性、酸雨敏感性)数据、中国生态服务功能重要性(水源涵养功能重要性、防风固沙功能重要性、土壤保持功能重要性、生物多样性维持与保护功能重要性、洪水调蓄功能重要性)数据。获取到的中国生态系统敏感性数据分为 5 个等级,分别为极敏感、高度敏感、中度敏感、轻度敏感与一般地区。中国生态服务功能重要性等级为 4 个等级,分别为极重要、重要、中等重要与一般。对各类敏感性与各类服务功能重要性进行叠加后得到研究区生态系统敏感性和生态服务功能重要性,依据《生态保护红线指南》3 等级划分原则,对生态系统敏感性和生态服务功能重要性进行重分类,采用“就高则高”的原则(表 1),将生态系统敏感性与生态服务功能重要性进行集成性评价。

生态区是按生态系统类型、地理特征等自然条件,在生态大区的基础上划分的^[24-26]。从中国生态系统评估与生态安全数据库获取新疆生态区,通过 Arcgis 裁剪获取吐哈地区生态区类型,分别为阿尔泰山—准噶尔西部山地森林与草原生态区(简称阿尔泰生态区)、准噶尔盆地荒漠生态区(简称准噶尔生态区)、天山山地森林与草原生态区(简称天山生态区)、塔里木盆地—东疆荒漠生态区(简称塔里木生态区)。

表 1 生态保护重要性等级别矩阵

Table 1 Ecological conservation importance hierarchy matrix

生态服务保护重要性 Importance of ecosystem services protection	生态敏感性 Ecological sensitivity		
	极敏感 Highly sensitive	敏感 Sensitivities	一般敏感 General sensitivity
极重要 Extremely important	极重要	极重要	极重要
重要 Critical	极重要	重要	重要
一般重要 General importance	极重要	重要	一般重要

1.2.2 植被面积统计

通过在资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/Default.aspx>)下载得到 1990—2020 年每 5 年共 7 个代表年份的 1km 中国土地利用遥感监测数据。利用 Arcgis 通过掩膜提取分析得到吐哈地区各植被面积,数据分为 6 个一级类型以及 25 个二级类型。本研究将 25 个二级地类中的有林地、灌木林、疏林地、其它林地、高覆盖草地、中覆盖草地与低覆盖草地作为植被生态需水的研究对象。按照 1.2.1 中对吐哈地区生态保护等级划分的各区域与依据生态类型划分的生态区统计各区内各类植被的面积,进行植被生态需水量估算。

1.2.3 改进的彭曼(Penman)公式

通常彭曼公式法计算的是在供水充足、供肥合适、无病、无虫害等理想条件下植被获得的需水量^[27-29]。这实际上计算的是植被最大生态需水量,而非维持植物生存的实际生态需水量,改进后的彭曼(Penman)公式法(简称改进的 PM 法)是指通过计算植物潜在蒸发量并与植被系数与土壤限制系数联合来推算植物实际需水量^[30],计算公式如下:

$$W = ET_k \times A_k \quad (1)$$

式中, W 为植被生态需水总量(亿 m^3), ET_k 为第 k 种植被需水定额(mm), A_k 为第 k 种植被面积(m^2)。

$$ET_k = ET_0 \times K_s \times K_c \quad (2)$$

式中, ET_0 为参考作物的蒸散发(mm), K_s 为植被的土壤水分限制系数, K_c 为第 k 种植被的植被系数。

(1) 蒸散发计算

参考作物的蒸散发量(ET_0)的计算采用彭曼提出的彭曼公式(Penman-Monteith)^[8],具体公式如下:

$$E T_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + r \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + r(1 + 0.34 u_2)} \quad (3)$$

式中, $E T_0$ 为参考作物蒸散发量 (mm/d), Δ 为饱和水汽压曲线斜率 (kPa/°C), G 为土壤热通量 ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), r 为湿度表常数 (kPa/°C), u_2 为 2m 高处风速 (m/s), e_s 为饱和水汽压 (kPa), e_a 为实际水汽压 (kPa), R_n 为地表净辐射 ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)。

参考作物蒸散发数据来自学者王蕾通过气象数据制作的 1km 吐哈盆地逐月参考作物蒸散发 $E T_0$ 数据集^[31]。

(2) 土壤-水分限制分析

土壤水分限制系数 (又称凋萎系数), 它主要受土壤质地的影响。采用新疆 42 个站点处土壤影响因素 k_s 取多年平均值数据中的哈密站点与吐鲁番站点数据^[32], 其中哈密 k_s 为 0.35, 吐鲁番 k_s 为 0.366, 取平均值 0.36 作为吐哈盆地地区整体的 k_s 。

(3) 植被系数

植被系数是关于植被覆盖度、植被高度及叶面积指数的函数, 随着植被生长期的变化而变化。吐哈地区不同植被的植被系数按照生长初、末期植被叶面积指数与生长中期叶面积指数的比例进行确定。通过参考相关学者的研究^[33-34], 新疆各地区植被生长季为 4—10 月, 植被生长阶段分为生长初期 (4 月)、生长发展期 (5—6 月)、生长中期 (7—9 月)、生长后期 (10 月), 确定各植被类型植物生长期规律和植物系数 (表 2)。

表 2 各植被类型植物生长期规律和植物系数

Table 2 Regularity of plant growth period and crop coefficient of each vegetation type

植被类型 Vegetation type	生长初期 (4 月) Early growth (April)	生长发展期 (5—6 月) Growth and development period (May—June)	生长中期 (7—9 月) Mid-growth (July—September)	生长后期 (10 月) Late growth (October)
有林地 Woodland	0.53	1.04	1.13	0.97
灌木林 Low wood	0.19	0.33	0.58	0.60
疏林地 Open woodland	0.20	0.52	0.91	0.78
其它林地 Other forest land	0.45	0.55	0.85	0.60
高覆盖草地 High grassland	0.23	0.44	0.55	0.45
中覆盖草地 Medium covered grass	0.15	0.20	0.30	0.25
低覆盖草地 Low covered grass	0.11	0.18	0.25	0.15

1.2.4 潜水蒸散法

该方法适用于干旱区植被生存主要依赖地下水的情况^[35], 建立计算天然植被生态环境需水 W 的数学计算方法:

$$W = \sum_{i=1}^n W_i = \sum_{i=1}^n S_i \times W_{gi} \times K_c \times 10^{-3} \quad (4)$$

式中, W 为植被生态需水总量 (亿 m^3), W_i 为各类植被 i 的潜水蒸发量 (亿 m^3), S_i 为各类植被 i 的面积 (万 hm^2), W_{gi} 为各类植被 i 所处某一地下水埋深时的潜水蒸发量 (mm), K_c 为植被系数, 是有植被地段与无植被地段的潜水蒸发量比值。本文通过查阅采用相关方法计算西北干旱区植被生态需水文献的基础上采用宋郁东等^[36]提出的植被影响系数及各类型植被埋深 (表 3、表 4)。目前潜水蒸发量常用的计算公式为阿维里扬诺夫公式:

$$W_g = a(1 - H/H_{\max})^b E_{20} \quad (5)$$

式中, H 为地下水埋深 (m), H_{\max} 为地下水极限埋深 (m), 参考相关文献取 5m 为极限埋深, a 、 b 为经验系数分别为 0.62、2.8^[37-38], E_{20} 为 20cm 小型蒸发皿蒸发量 (mm)。因为 E_{20} 实测数据较难获取且多地采用为 E_{601} 数

据,所以参考周丹等^[39]研究可以用参考作物蒸散发来替代 E_{20} ,且拟合分析对比后相关性系数达到 0.876,替代公式如下:

$$E_{20} = 2.1788 ET_0 - 202.11 \quad (6)$$

表 3 不同潜水埋深的植被系数

Table 3 Vegetation coefficient for different submersible depths

潜水埋深/m Diving depth	植被系数 Vegetation coefficient	潜水埋深/m Diving depth	植被系数 Vegetation coefficient
1.0	1.98	3.0	1.38
1.5	1.63	3.5	1.29
2.0	1.56	4.0	1.00
2.5	1.45		

表 4 研究区不同类型植被的平均潜水埋深

Table 4 Average submersible burial depth of different types of vegetation in the study area

植被类型 Vegetation type	潜水埋深/m Diving depth	植被系数 Vegetation coefficient	植被类型 Vegetation type	潜水埋深/m Diving depth	植被系数 Vegetation coefficient
有林地 Woodland	2.0	1.56	高覆盖草地 High grassland	2.5	1.45
灌木林 Low wood	3.0	1.38	中覆盖草地 Medium covered grass	3.0	1.38
疏林地 Open woodland	3.5	1.29	低覆盖草地 Low covered grass	4.0	1.00
其它林地 Other forest land	4.0	1.00			

1.2.5 生态分区计算法

通过上述对改进的彭曼公式与潜水蒸散发法介绍已经了解到各自方法的适用条件,这里根据不同生态区的气候条件与生态系统类型特征^[40],即阿尔泰生态区与天山生态区内植被生长条件及降水环境要优于准噶尔与塔里木生态区,并通过地球资源数据云平台(www.gis5g.com)的 1990—2020 年年均降水量数据,分辨率为 1km×1km,对不同生态区年均降水对比加以验证。基于此,采用生态分区估算植被生态需水的方法,在阿尔泰生态区与天山生态区内采用改进的彭曼公式法计算植被生态需水量,在相对于旱、降雨量极端稀少的准噶尔生态区与塔里木生态区采用在极端干旱区下适用条件较好的潜水蒸散发法。

2 结果与讨论

2.1 吐哈地区生态保护重要性等级及生态区

对吐哈地区生态服务重要性与生态系统敏感性进行叠加双评价后得到吐哈地区生态保护重要性分级,将吐哈地区分为极重要保护区、重要保护区与一般保护区。极重要保护区占吐哈地区的 47.8%,重要保护区占吐哈地区的 8.7%,一般保护区占吐哈地区的 43.5%。对于吐哈地区按生态区类型划分为阿尔泰生态区占吐哈地区的 1.6%,准噶尔生态区占吐哈地区的 12.5%,天山生态区占吐哈地区的 21.7%,塔里木生态区占吐哈地区的 64.2%(图 2)。

为进一步验证不同生态区内的降水条件不同,对比研究区 1990—2020 年中 7 个代表年份的年均降水量。四个生态区类型中天山生态区与阿尔泰生态区的年均降水量要多于准噶尔与塔里木生态区,且准噶尔生态区与塔里木生态区年均降水极度稀少(图 3),这为吐哈地区计算植被生态需水采用生态分区计算方法提供依据。

2.2 近 30 年吐哈地区各生态区与保护等级区植被变化特征

基于吐哈地区 1km 土地利用数据,统计 1990、1995、2000、2005、2010、2015、2020 等 7 个时期 7 类植被总面积(图 4)。在水平年内草地覆盖面积远远大于林地,草地类型中低覆盖草地面积占比最大,近 30 年内植被

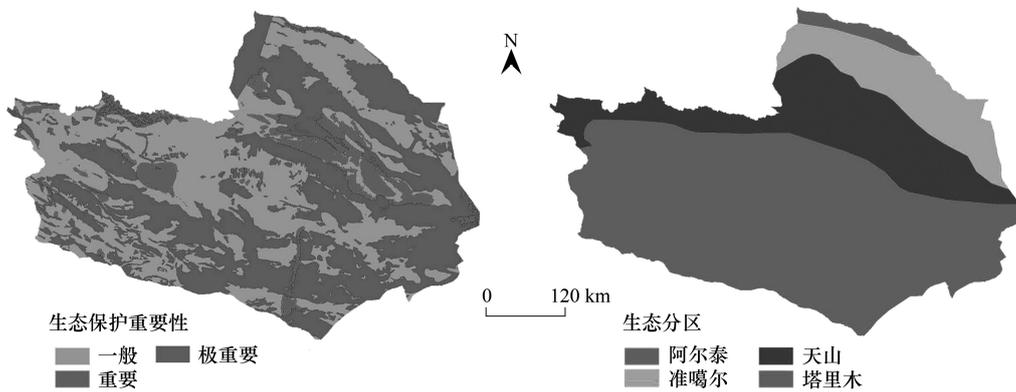


图 2 吐哈地区生态保护重要性等级与生态分区

Fig.2 Ecological conservation importance levels and ecological zoning in the Tuha Region

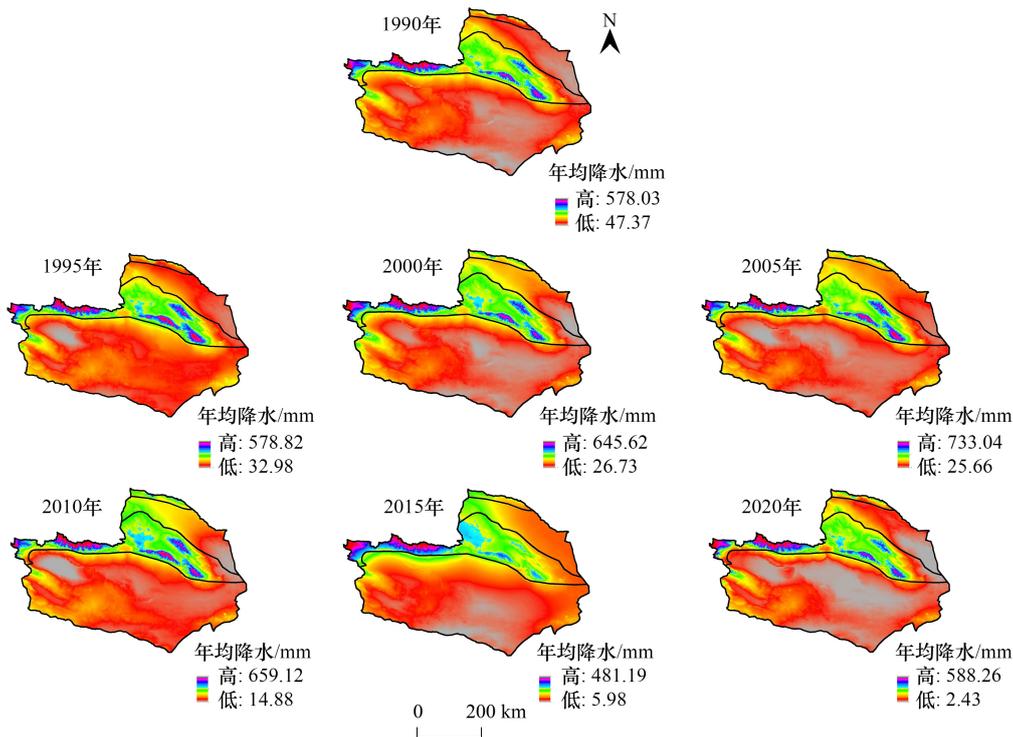


图 3 吐哈地区 1990—2020 年年均降水量

Fig.3 Average annual precipitation in Tuha from 1990 to 2020

面积总体呈增长趋势。2005—2010 年植被总面积增长最大,由 3.12 万 km²增长到 3.91 万 km²,植被总面积的增长主要原因是低覆盖草地面积的增长,由 1.64 万 km²增长到 2.42 万 km²(表 5)。吐哈地区植被覆盖面积的增长得益于《新疆生态环境保护工程建设》(2010 年)的提案获得国家林业和草原局批准,吐哈地区生态文明建设进一步扎实推进^[41]。

进一步通过土地利用转移矩阵结合桑基图分析得到:1990—1995 年期间,林地、水域、未利用地面积有所减少,且未利用地减少面积主要转为草地和城乡用地。1995—2000 年期间,未利用地转为耕地、林地、草地、水域等四种用地类型(图 5)。

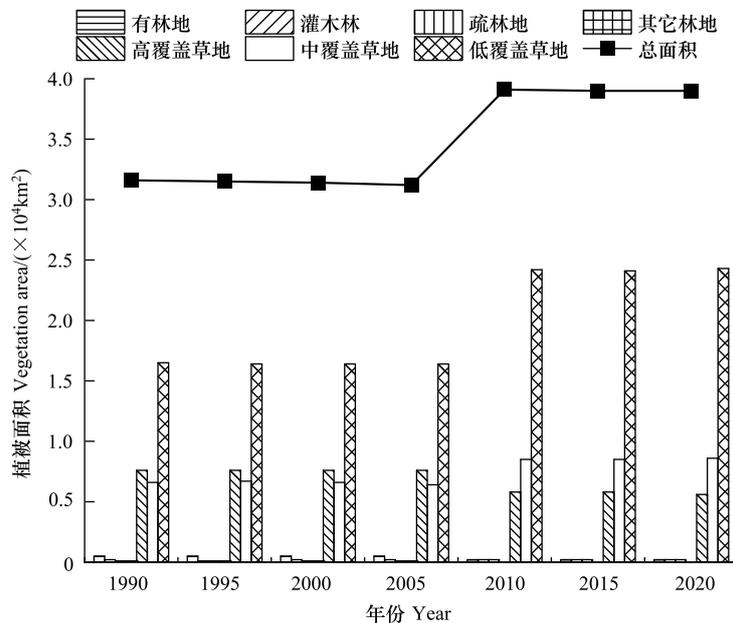


图 4 近 30 年各类型植被面积

Fig.4 The area of vegetation of various types in the past 30 years

表 5 近 30 年各类植被面积/万 km²

Table 5 The area of vegetation of various types in the past 30 years

植被类型 Vegetation type	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
有林地 Woodland	0.05	0.05	0.05	0.05	0.02	0.02	0.02
灌木林 Low wood	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
疏林地 Open woodland	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
其它林地 Other forest land	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
高覆盖草地 High grassland	0.76	0.76	0.76	0.76	0.58	0.58	0.56
中覆盖草地 Medium covered grass	0.66	0.67	0.66	0.64	0.85	0.85	0.86
低覆盖草地 Low covered grass	1.65	1.64	1.64	1.64	2.42	2.41	2.43
总面积 Total area	3.16	3.15	3.14	3.12	3.91	3.90	3.90

2000—2005 年期间,耕地、林地、城乡用地面积增加显著,草地和水域面积减少明显,草地减少面积主要转为耕地、林地和未利用地,水域减少面积主要转为未利用地。2005—2010 年期间,耕地、林地、水域和城乡用地面积均有所增加,而草地和未利用地面积减少,草地减少面积主要转为耕地,未利用地减少面积主要转为耕地和水域(图 6)。

2010—2015 年期间,耕地、水域面积继续增加,耕地和城乡用地面积增幅明显,未利用地面积明显减少,未利用地减少面积主要转为耕地、草地和城乡用地。2015—2020 年期间,土地利用类型发生重大变化,耕地、草地、城乡用地面积增加,三种土地类型增幅均较为显著;林地、水域、未利用地面积减少明显,林地减少面积主要转为耕地、草地,未利用地减少面积主要转为耕地、草地(图 7)。以上结果与已有相关结果一致^[3,42]。

根据吐哈地区四个生态区近 30 年植被覆盖显示:天山生态区内植被覆盖总面积大于其它三个生态区内植被覆盖面积(表 6)。主要原因是该生态区相较于阿尔泰与准噶尔生态区面积占比大,其次相较于生态区占比最大的塔里木生态区,天山生态区降水较多,环境有利于植被生长。天山生态区与准噶尔生态区植被覆盖面积在近 30 年内植被覆盖面积显著增大,阿尔泰生态区与塔里木生态区植被覆盖面积在近 30 年内呈现振荡趋势,这可能与不同生态区拥有不同环境特点以及生态文明政策具体实施的重点区域有关。

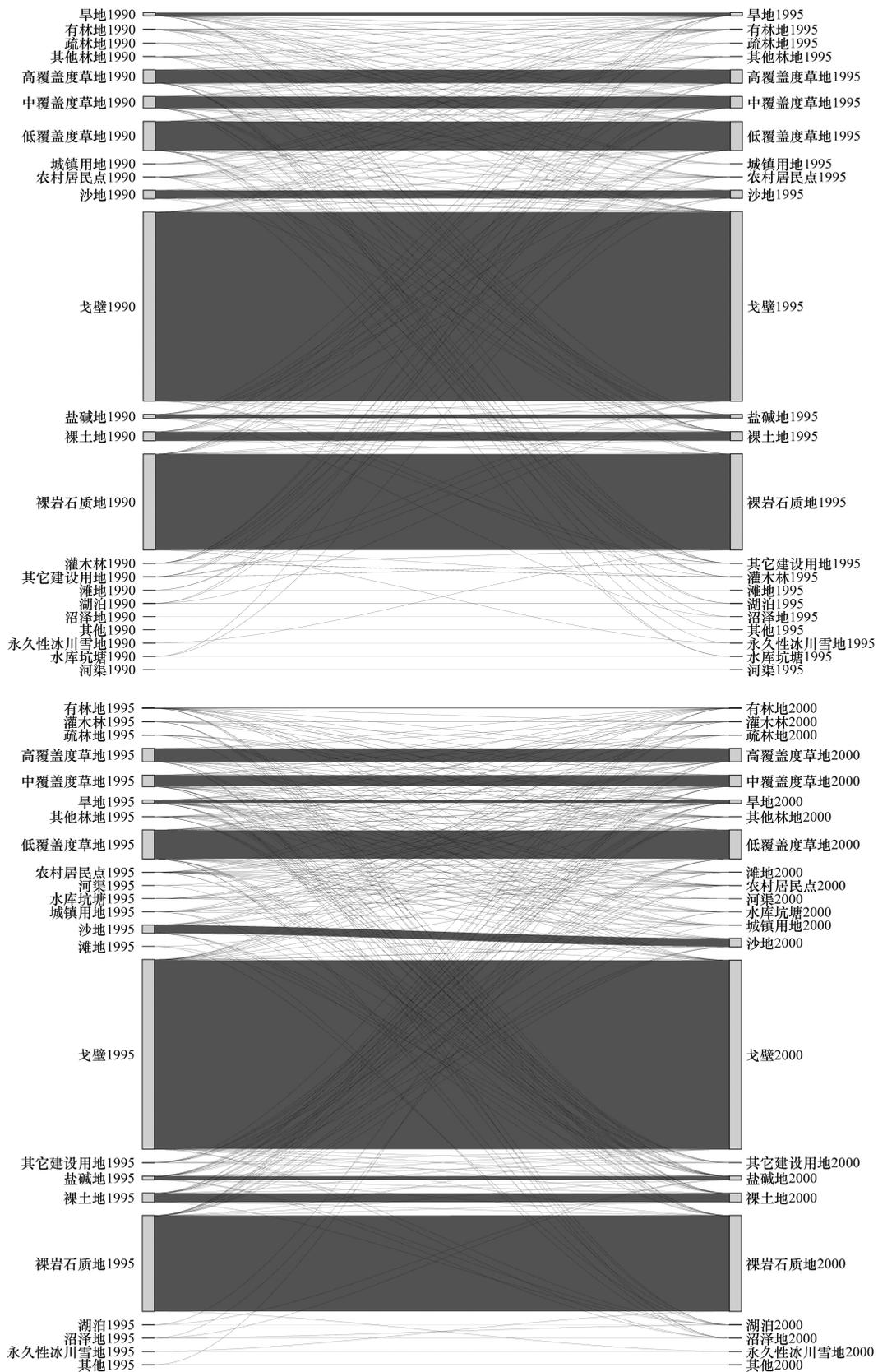


图 5 1990—2000 土地利用转移矩阵桑基图

Fig.5 Sankey diagram of land use transfer matrix from 1990 to 2000

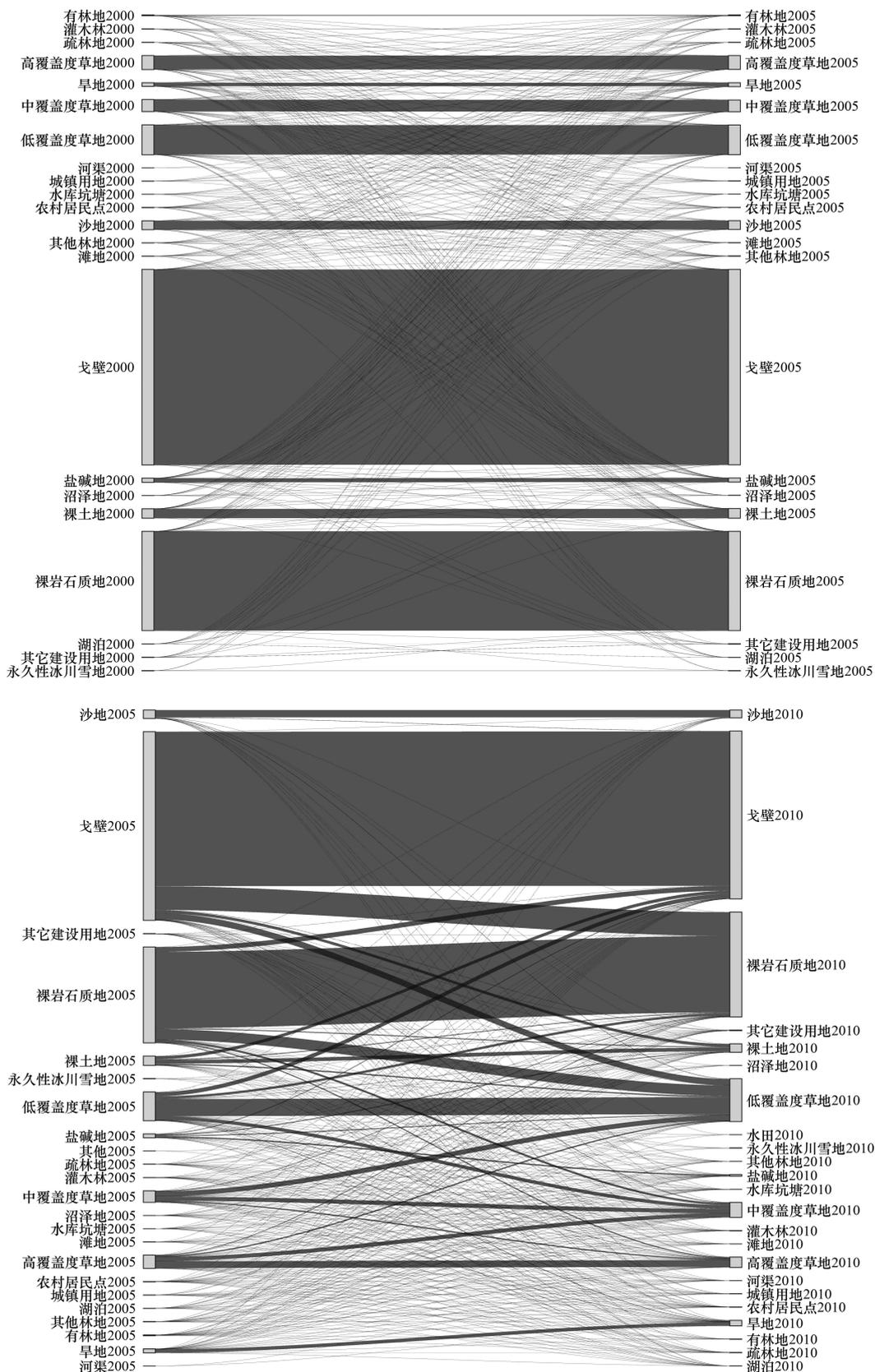


图 6 2000—2010 土地利用转移矩阵桑基图

Fig.6 Sankey diagram of land use transfer matrix from 2000 to 2010

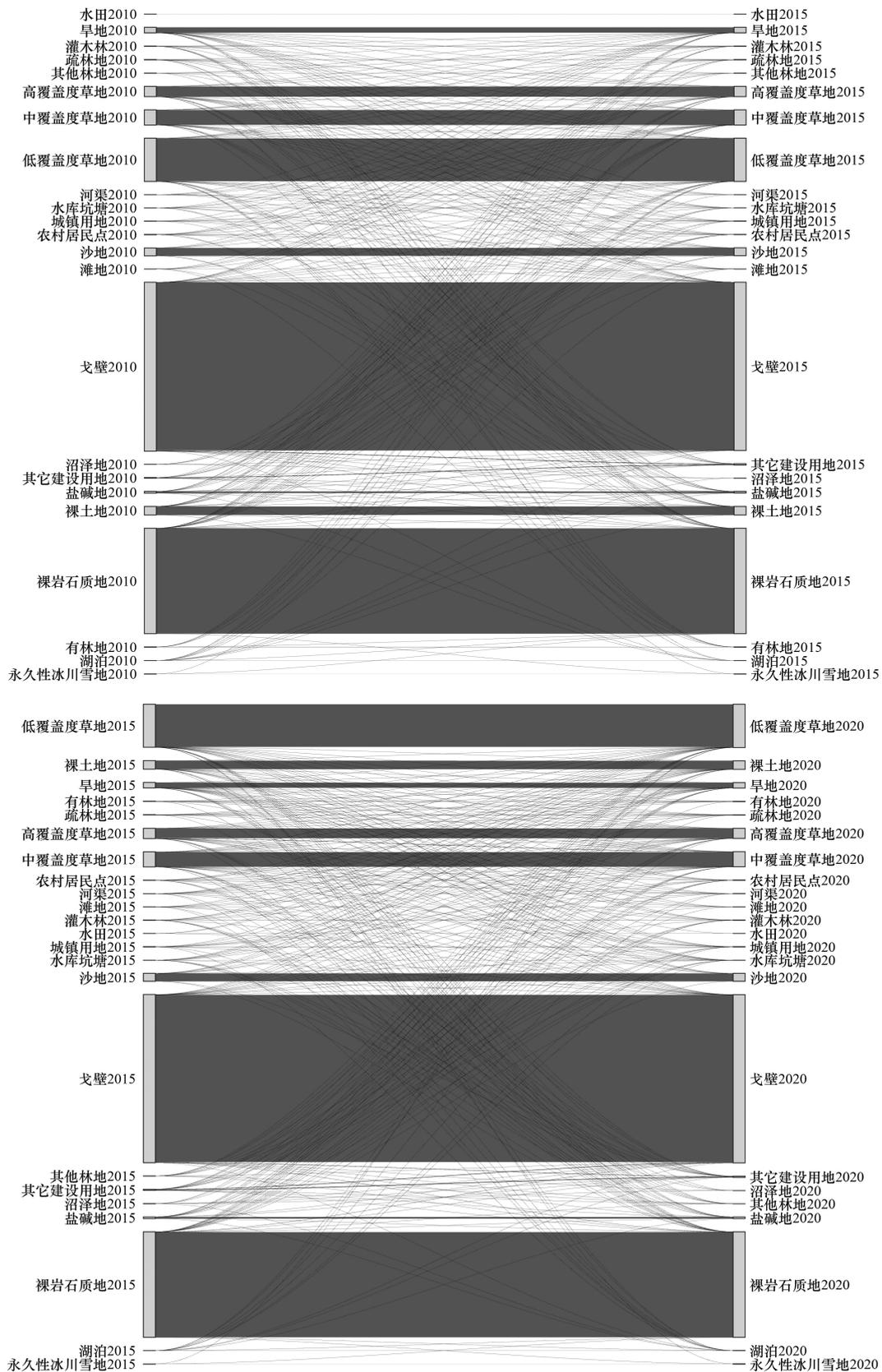


图 7 2010—2020 土地利用转移矩阵桑基图

Fig.7 Sankey diagram of land use transfer matrix from 2010 to 2020

表 6 近 30 年各生态区植被面积/万 km²

Table 6 Vegetation area of each ecological region in the past 30 years

生态区 Ecological zone	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
阿尔泰 Altai	0.08	0.08	0.08	0.08	0.05	0.05	0.05
准噶尔 Dzungar	0.10	0.10	0.09	0.09	0.42	0.42	0.42
天山 Tianshan	2.36	2.35	2.37	2.35	2.76	2.76	2.76
塔里木 Tarim	0.63	0.62	0.60	0.59	0.67	0.67	0.67
总面积 Total area	3.16	3.15	3.14	3.12	3.91	3.90	3.90

吐哈地区不同生态保护等级植被覆盖显示:水平年内一般生态保护等级内植被覆盖面积最大。1990—2005 年期间一般生态保护等级区内植被覆盖面积相比于重要与极重要生态保护等级大 0.4 万 km²。2005—2010 年期间极重要生态保护等级内植被面积增长迅速,该等级区在 2010—2020 年植被面积总量基本稳定在 1.4 万 km²左右,相较于一般生态保护等级区植被覆盖面积差距缩小到 0.1 万 km²左右(表 7)。极重要生态保护等级内植被面积在近 30 年内的显著增大,体现出当地政府在采取相关生态保护政策时的优先性,这也证明了划分不同生态保护重要性等级的合理性。

表 7 近 30 年各保护等级植被面积/万 km²

Table 7 The vegetation area of each ecological protection level in the past 30 years

保护等级 Protection level	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
极重要 Extremely important	0.93	0.93	0.91	0.89	1.41	1.40	1.40
重要 Critical	0.92	0.92	0.93	0.92	1.00	1.00	1.00
一般 General	1.31	1.31	1.30	1.30	1.50	1.50	1.50
总面积 Total area	3.16	3.15	3.14	3.12	3.91	3.90	3.90

2.3 吐哈地区植被生态需水量

2.3.1 改进的彭曼公式

基于改进的彭曼公式计算得到的吐哈地区极重要保护等级地区、重要保护等级地区与一般保护等级近 30 年内 7 个代表年份的植被生态需水量(图 8)。在极重要保护等级地区植被生态需水量显著增加,在重要保护等级区与一般保护等级区在近 30 年来植被生态需水量变化并不显著。极重要保护等级地区植被生态需水量由 12.12 亿 m³增加到 18.54 亿 m³(表 8)。相较于重要保护等级与一般保护等级区,极重要保护等级区植被生态需水量显著增加主要是该保护等级区内植被面积在 2005—2010 期间显著增大,这主要体现在天山生态区与准噶尔生态区内植被面积显著增大。

表 8 近 30 年各保护等级区植被生态需水量/亿 m³(改进的 PM 法)

Table 8 Ecological water demand of vegetation in each protection level area in the past 30 years (improved PM method)

年份 Year	极重要 Extremely important	重要 Critical	一般 General	总需水 Total water demand
1990	12.12	17.83	20.22	50.18
1995	11.05	16.15	18.37	45.58
2000	11.14	16.42	18.73	46.29
2005	11.99	17.83	20.51	50.33
2010	17.19	17.37	19.34	53.90
2015	16.54	15.79	18.66	50.98
2020	18.54	17.75	21.51	57.80

利用改进的彭曼公式估算吐哈地区植被生态需水量变化趋势,1990—1995 年植被生态需水量降低,1995—2010 年植被生态需水量持续增长,2010—2015 年植被生态需水量降低,2015—2020 年植被生态需水

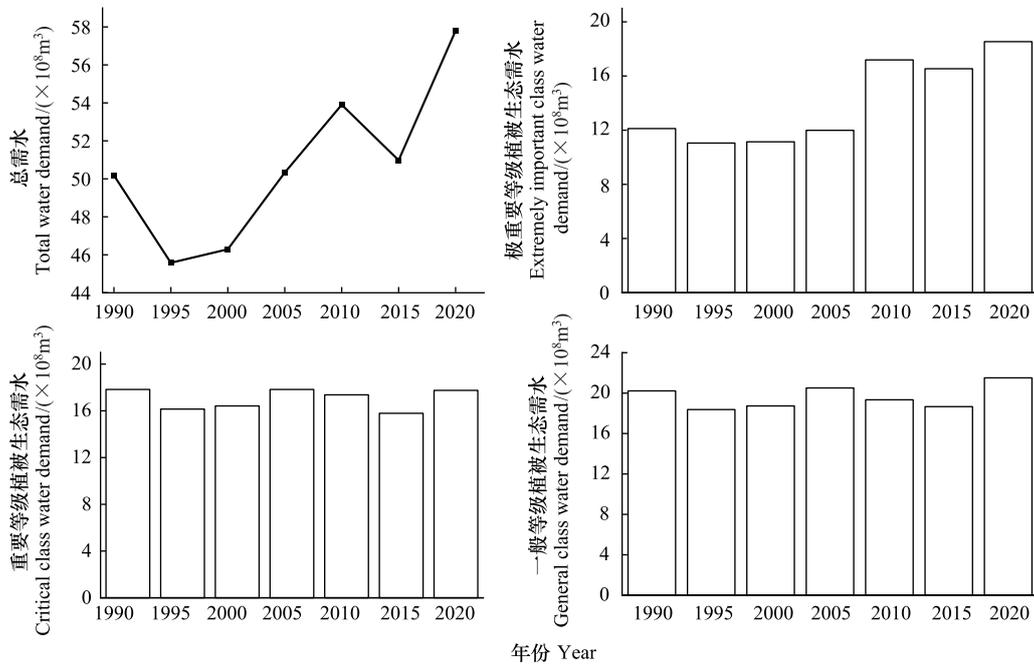


图 8 改进 PM 法估算近 30 年各生态保护等级植被生态需水

Fig.8 Improvement of the PM method to estimate the ecological water demand of vegetation in each ecological protection class in the last 30 years

量增长,在 2000—2015 期间变化趋势与已有对吐哈地区 2000—2015 期间植被生态需水变化研究结果一致^[19]。

2.3.2 潜水蒸散法

基于潜水蒸散法计算得到吐哈地区极重要保护等级区、重要保护等级地区与一般保护等级近 30 年内 7 个代表年份的植被生态需水量(图 9)。相比于改进的 PM 公式,潜水蒸散法估算的吐哈地区的植被生态需水总量在 1990—2005 年与 2010—2020 年期间与其计算结果变化趋势一致,而 2005—2010 年潜水蒸散发估算的结果呈现下降趋势。主要原因是在这期间低覆盖草地的面积虽然增加,但林地面积与高覆盖草地面积呈现出减少情况,这对潜水蒸散法的估算影响要大于改进的 PM 法,因此在这期间呈现不同趋势。对于不同生态保护重要性等级来说,潜水蒸散发在极重要保护等级地区估算的植被生态需水量相比于改进的 PM 法估算结果在近 30 年间增加更为显著,由 8.43 亿 m³增长到 12.84 亿 m³(表 9),2005—2015 年期间在重要保护等级地区与一般保护等级区内估算得到的植被生态需水量下降更加显著。

表 9 近 30 年各保护等级植被生态需水量/亿 m³(潜水蒸散法)

Table 9 In the past 30 years, the ecological water demand of vegetation at various protection levels (submersible evapotranspiration method)

年份 Year	极重要 Extremely important	重要 Critical	一般 General	总需水 Total water demand
1990	8.43	25.55	20.44	54.42
1995	7.76	23.31	18.63	49.70
2000	7.77	23.52	18.96	50.26
2005	8.27	25.61	20.81	54.69
2010	12.12	19.49	16.74	48.35
2015	11.71	17.80	16.08	45.59
2020	12.84	20.34	18.67	51.85

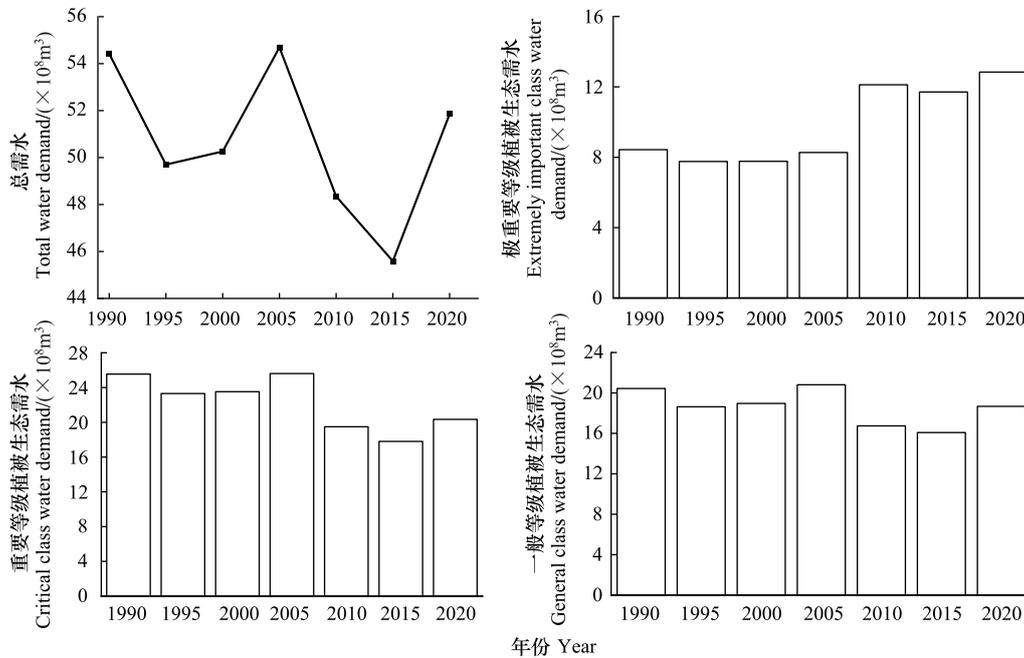


图9 潜水蒸散法估算近30年各生态保护等级保护区生态需水

Fig.9 Estimation of ecological water demand in protected areas of various ecological protection classes in the last 30 years by the diving evapotranspiration method

对比潜水蒸散法与改进的彭曼公式法估算的近30年各生态保护重要性等级的植被生态需水量,两种方法在每个生态保护重要性等级估算的植被生态需水量变化趋势都是一致的,这也证明了干旱半干旱区植被生态需水量采用这两种计算方法的合理性^[43]。

2.3.3 生态分区计算法

依据划分的生态区生态环境与降水条件不同选取分生态区计算吐哈地区植被生态需水量,即阿尔泰生态区与天山生态区采取改进的PM公式,在准噶尔生态区与塔里木生态区采用潜水蒸散法计算吐哈地区近30年7个代表年份的植被生态需水量,结果显示(图10),对于吐哈地区植被生态需水总量,生态分区计算方法在近30年内估算结果变化趋势与改进的彭曼法完全相同,与潜水蒸散法对比也仅是2005—2010年期间变化趋势不同。对于各生态保护重要性等级,生态分区法估算的极重要生态保护区植被生态需水量相比于上述两种方法变化最为显著,在极重要生态保护区植被生态需水量由9.54亿 m^3 增长到14.92亿 m^3 (表10)。

表10 近30年各保护等级植被生态需水量/亿 m^3 (生态分区法)

Table 10 Ecological water demand of vegetation at different protection levels in the past 30 years (calculated by ecological region)

年份 Year	极重要 Extremely important	重要 Critical	一般 General	总需水 Total water demand
1990	9.54	17.81	18.22	45.58
1995	8.71	16.14	16.50	41.35
2000	8.72	16.40	16.85	41.96
2005	9.40	17.77	18.44	45.61
2010	14.07	17.09	17.60	48.76
2015	13.55	15.51	16.98	46.03
2020	14.92	17.45	19.66	52.03

对比改进的彭曼公式法与潜水蒸散法,生态分区计算方法估算出的各生态保护等级植被生态需水量在

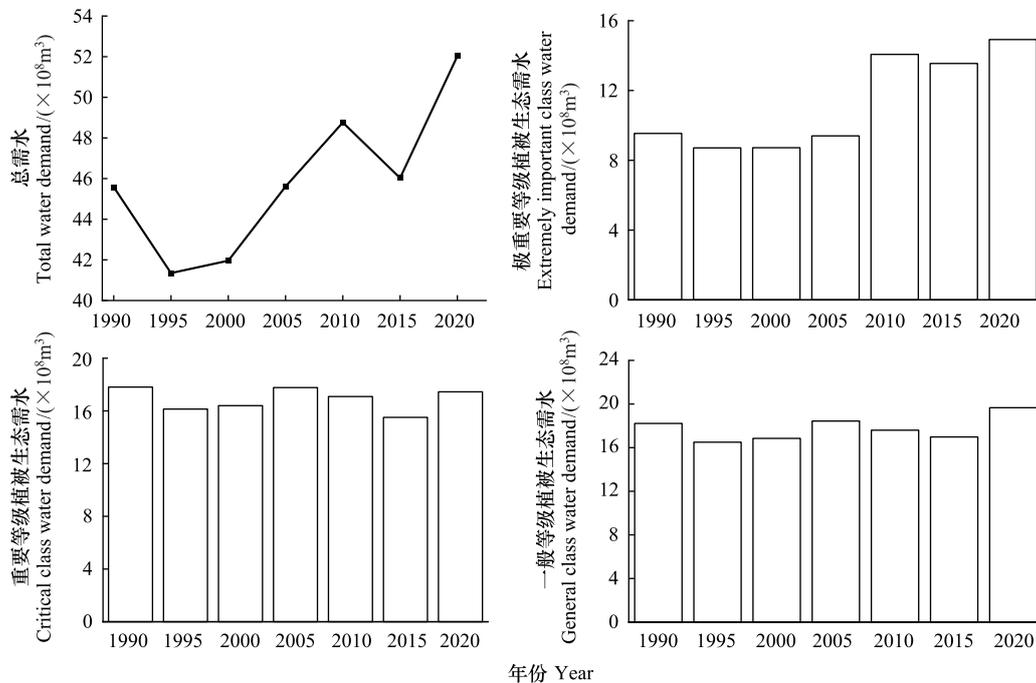


图 10 生态分区法估算近 30 年各生态保护等级区植被生态需水

Fig.10 Estimation of ecological water demand of vegetation in each ecological protection class area in the last 30 years by ecological zoning method

1990—2020 每 5 年期间的变化趋势与其它两种方法相同,这表明生态分区估算植被生态需水的方法是合理的。

3 结论与展望

3.1 结论

本文将吐哈地区进行了生态分区与生态保护分级,并在此基础上统计出各分区与各保护分级植被覆盖面积,进而通过改进的 PM 公式、潜水蒸散法与生态分区综合计算三种方法估算了吐哈地区不同生态保护等级区内的植被生态需水量。结果表明:

(1) 1990—2020 期间吐哈地区植被总面积增大。1990—2005 年植被总面积稳定在 3.12 万 km^2 左右,在 2005—2010 年植被面积显著增加,2010—2020 年吐哈地区植被面积稳定在 3.9 万 km^2 左右。

(2) 通过对比吐哈地区 3 个生态保护等级需水情况来看,极重要保护等级区的植被需水量在 1990—2020 年期间不断增大,特别是 2005—2010 年期间,这主要是因为极重要生态保护区植被覆盖面积的显著增长。

(3) 使用三种方法估算的吐哈地区植被生态需水量结果来看,三种方法估算的植被生态需水量在某些年内会存在着一定的差距。改进的彭曼公式估算的吐哈全区域植被生态需水由 1990 年 50.18 亿 m^3 变化到 2020 年 57.8 亿 m^3 ,潜水蒸散法由 1990 年 54.42 亿 m^3 变化到 2020 年 51.85 亿 m^3 ,生态分区法由 1990 年 45.58 亿 m^3 变化到 2020 年 52.03 亿 m^3 。这是因为每种植被生态需水计算方法都会被各种因素影响,导致计算结果有相当的不确定性^[43]。但在 1990—2020 年期间看三种方法估算的结果的变化趋势基本一致,并且使用三种方法在不同生态保护重要性等级估算的近 30 年植被生态需水变化趋势完全一致,说明生态分区计算植被生态需水的方法是合理的。

利用了三种植被生态需水估算对比,证明了生态分区计算植被生态需水量的合理性,此外本研究将研究区按生态保护等级重要性进行划分,分别计算不同生态保护等级区的植被生态需水,也为当地政府的调水补水方案提供思路。

3.2 展望

(1) 本研究仅将吐哈地区植被按土地利用类型划分为二级类,并未进一步划分植被种类。今后的研究可以通过遥感等科学技术将吐哈植被类型更精化,依据每种植被类型的植被特性,如从胡杨林、沙柳等植被生理特性角度,估算吐哈地区植被生态需水量。

(2) 植被生态需水量受气候、降水等多种因素影响,建议今后可多从气温、降水、地下水动态变化及冰川融水等方面进行深入研究。

(3) 本研究提出对于吐哈地区用水管理的具体方案措施。建议今后进一步加强与吐哈政府部门的联系,与研究结合,提出具体水资源配置管理方案。

参考文献 (References):

- [1] 陈亚宁, 李忠勤, 徐建华, 沈彦俊, 邢晓旭, 谢天, 李稚, 杨林山, 席海洋, 朱成刚, 方功焕, 司建华, 张元明. 中国西北干旱区水资源与生态环境变化及保护建议. 中国科学院院刊, 2023, 38(3): 385-393.
- [2] 史亚丽, 贾强. 新疆生态环境治理法治化研究. 黑龙江环境通报, 2023, 36(9): 135-138.
- [3] 王瑾杰, 丁建丽, 张子鹏. 基于遥感生态指数的吐哈地区生态环境变化研究. 干旱区地理, 2022, 45(5): 1591-1603.
- [4] Thevs N, Peng H Y, Rozi A, Zerbe S, Abdusalih N. Water allocation and water consumption of irrigated agriculture and natural vegetation in the Aksu-Tarim River Basin, Xinjiang, China. *Journal of Arid Environments*, 2015, 112:87-97.
- [5] 冯起, 高前兆, 司建华, 席海洋. 干旱内陆河流域水文水资源. 北京: 科学出版社, 2019.
- [6] Ye Z X, Chen Y N, Li W H. Ecological water demand of natural vegetation in the lower Tarim River. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, 20(2): 261-272.
- [7] 朱婉怡, 张振克, 郭新亚, 冯首铭, 蒋大亮, 江飞. 马拉河流域植被生态需水特征及估算. 生态学报, 2023, 43(18): 7523-7535.
- [8] 刘钰, Pereira L S. 对 FAO 推荐的作物系数计算方法的验证. 农业工程学报, 2000, 16(5): 26-30.
- [9] Oki T, Kanae S. Virtual water trade and world water resources. *Water Science & Technology*, 2004, 49(7): 203-209.
- [10] 汤奇成. 绿洲的发展与水资源的合理利用. 干旱区资源与环境, 1995, 9(3): 107-112.
- [11] Crawford R M M. Eco-hydrology: plants and water in terrestrial and aquatic environments. *Journal of Ecology*, 2000, 88(6): 1095-1096.
- [12] 贾宝全, 慈龙骏. 新疆生态用水量的初步估算. 生态学报, 2000, 20(2): 243-250.
- [13] Groeneveld D P. Remotely-sensed groundwater evapotranspiration from alkali scrub affected by declining water table. *Journal of Hydrology*, 2008, 358(3/4): 294-303.
- [14] 陈亚宁, 郝兴明, 李卫红, 陈亚鹏, 叶朝霞, 赵锐锋. 干旱区内陆河流域的生态安全与生态需水量研究——兼谈塔里木河生态需水量问题. 地球科学进展, 2008, 23(7): 732-738.
- [15] 李卫红, 陈忠升, 李宝富, 付爱红, 周洪华. 新疆开都-孔雀河流域绿洲需水量与稳定性分析. 冰川冻土, 2012, 34(6): 1470-1477.
- [16] Chi D K, Wang H, Li X B, Liu H H, Li X H. Estimation of the ecological water requirement for natural vegetation in the Ergune River Basin in Northeastern China from 2001 to 2014. *Ecological Indicators*, 2018, 92: 141-150.
- [17] 马玉其, 王军政, 程勇, 王新友, 陈小强, 崔华, 叶朝霞. 新疆开都—孔雀河流域天然植被生态需水量研究. 环境与可持续发展, 2020, 45(3): 139-143.
- [18] 尹小君, 周可法, 包安明, 王涛, 孙莉. 基于 RS 的新疆哈密地区生态环境需水分析. 干旱区地理, 2007, 30(3): 357-363.
- [19] 黎达辉. 新疆植被生态需水估算与安全风险评估[D]. 上海: 华东师范大学, 2021.
- [20] 张爱民, 郝天鹏, 周和平, 马占宝, 崔师胜. 新疆白杨河流域特征及生态植被需水分析. 生态学报, 2021, 41(5): 1921-1930.
- [21] 郝天鹏, 李旗进, 周和平. 新疆平原区天然绿洲生态需水研究. 水资源开发与管理, 2023, 9(5): 64-70.
- [22] 侯鹏, 杨旻, 翟俊, 刘晓曼, 万华伟, 李静, 蔡明勇, 刘慧明. 论自然保护地与国家生态安全格局构建. 地理研究, 2017, 36(3): 420-428.
- [23] Mohseni F, Sabzghabaei G, Dashti S. Management effectiveness and conservation prioritizing the protected areas using RAPPAM methodology (case study: Khuzestan Province). *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019, 191(3): 138.
- [24] 傅伯杰, 刘国华, 陈利顶, 马克明, 李俊然. 中国生态区划方案. 生态学报, 2001, 21(1): 1-6.
- [25] 倪健, 郭柯, 刘海江, 张新时. 中国西北干旱区生态区划. 植物生态学报, 2005, 29(2): 175-184.
- [26] 师庆东, 王智, 贺龙梅, 师庆三, 阿斯姆古丽·阿纳耶提, 刘曼, 常顺利. 基于气候、地貌、生态系统的景观分类体系——以新疆地区为例. 生态学报, 2014, 34(12): 3359-3367.

- [27] 郝博, 粟晓玲, 马孝义. 甘肃省民勤县天然植被生态需水研究. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2010, 38(2): 158-164.
- [28] Akumaga U, Alderman P D. Comparison of penman-monteith and priestley-taylor evapotranspiration methods for crop modeling in Oklahoma. *Agronomy Journal*, 2019, 111(3): 1171-1180.
- [29] Suleiman A A, Hoogenboom G. Comparison of priestley-taylor and FAO-56 penman-monteith for daily reference evapotranspiration estimation in *Georgia*. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2007, 133(2): 175-182.
- [30] 卞戈亚, 周明耀, 朱春龙. 生态需水量计算方法研究现状及展望. *水资源保护*, 2003, 19(6): 46-49.
- [31] Wang L, Wang J J, Ding J L, Li X. Estimation and spatiotemporal evolution analysis of actual evapotranspiration in Turpan and Hami cities based on multi-source data. *Remote Sensing*, 2023, 15(10): 2565.
- [32] 廖铁群. 基于 GIS 的新疆地区植被生态需水量研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
- [33] 刘钰, L.S.Pereira. 对 FAO 推荐的作物系数计算方法的验证. *农业工程学报*, 2000, 16(5): 26-30.
- [34] 陈亚宁. 新疆塔里木河流域生态保护与可持续管理. 北京: 科学出版社, 2015.
- [35] 赵文智, 常学礼, 何志斌, 张智慧. 额济纳荒漠绿洲植被生态需水量研究. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2006, 36(6): 559-566.
- [36] 胡顺军, 田长彦, 宋郁东. 干旱内陆河灌区灌溉入渗系数的测定与计算. *灌溉排水学报*, 2010, 29(02): 124-125.
- [37] 何志斌, 赵文智, 方静. 黑河中游地区植被生态需水量估算. *生态学报*, 2005, 25(4): 705-710.
- [38] 刘新华, 徐海量, 凌红波, 白元, 傅蕊仪, 赵新风. 塔里木河下游生态需水估算. *中国沙漠*, 2013, 33(4): 1198-1205.
- [39] 周丹, 沈彦俊, 陈亚宁, 郭英, 张勃. 西北干旱区荒漠植被生态需水量估算. *生态学杂志*, 2015, 34(3): 670-680.
- [40] 咎梅. 新疆森林碳通量和碳储量时空变化特征及其主要影响因子[D]. 南京: 南京大学, 2016.
- [41] 翟玉鑫, 张飞云, 马丽娜. 近 40 年新疆三生用地转型及其生态环境效应演变. *土壤通报*, 2022, 53(3): 514-523.
- [42] 杨良健, 曹开军. 新疆 85 个县市旅游生态安全时空格局演变及驱动机制. *生态学报*, 2021, 41(23): 9239-9252.
- [43] 胡广录, 赵文智. 干旱半干旱区植被生态需水量计算方法评述. *生态学报*, 2008, 28(12): 6282-6291.