

基于生态环境功能分区的关中一天水区生态需水量测评

钟旭珍¹, 王丽霞², 姚 昆³, 张 素¹

(1.内江师范学院 地理与资源科学学院, 四川 内江 641100; 2.长安大学
地质工程与测绘学院, 西安 710054; 3.西昌学院 资源与环境学院, 四川 西昌 615000)

摘 要:为了解研究区生态功能区内生态需水的分布特征,明确区域水土资源利用方向和生态整治重点,以关中一天水区为对象,将 RS 和 GIS 技术结合,完成其生态功能区划指标体系的建立与功能区划分,利用植被和土壤生态需水测评模型对该地区植被—土壤复合系统生态需水量和空间分布规律进行计算和分析,并借助 CA-Markov 模型对各生态功能区 2020 年、2025 年的单位面积生态需水进行了模拟预测。结果表明:关中一天水区生态环境功能区可划分为河道保护区、防旱抗旱区、农业种植区、植被保护区、水源涵养区和古城保护区 6 类;林地—黏壤土的生态需水最大,约为 659.60 mm,草地—砂砾质壤土的生态需水最低,约为 366.34 mm,极差为 293.26 mm;功能区内林地、耕地、草地分布范围越广,生态需水量越大,其中单位面积生态需水量最小的为古城保护区,生态需水总量最小的为河道保护区;预测结果显示,2015 年、2025 年单位面积生态需水量最大的为植被保护区,2020 年则为水源涵养区,而各年份生态需水总量最大的均为植被保护区。研究表明生态需水与土地利用方式和生态功能分区关系密切。

关键词:生态环境功能区; CA-Markov 模型; 植被—土壤复合系统; 生态需水; 关中一天水区

中图分类号:X826

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)06-0240-07

Evaluation of Ecological Water Demand in Guanzhong—Tianshui Area Based on Functional Zoning of Ecological Environment

ZHONG Xuzhen¹, WANG Lixia², YAO Kun³, ZHANG Su¹

(1.School of Geography and Resources Science, Neijiang Normal University,

Neijiang, Sichuan 641100, China; 2.College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University,

Xi'an 710054, China; 3.College of Resources and Environment, Xichang University, Xichang, Sichuan 615000, China)

Abstract: In order to understand the distribution characteristics of ecological water demand in the ecological function area of the study area, to clarify the direction of regional water and soil resources utilization and the key points of ecological improvement, Guanzhong—Tianshui area was taken as the research object, the ‘RS’ and ‘GIS’ technology were used to complete the establishment of its ecological function division index system and functional area division. Then, evaluation ecological water requirement and spatial distribution characteristics of vegetation-soil complex system in the study area were analyzed by using vegetation ecological water demand assessment model and soil ecological water demand assessment model, the spatial distribution of land use in the study area in 2020 and 2025 was simulated and predicted by using CA-Markov model, on this basis, the ecological water demand of each ecological function area in 2020 and 2025 was measured and analyzed. The results showed that the eco-environmental functional areas in Guanzhong—Tianshui area could be divided into river protection area, drought and drought-resistant area, agricultural planting area, vegetation protection area, water conservation area, ancient city protection area; on the landscape scale, the ecological water requirement per unit area of woodland-clay loam was the largest, about 659.60 mm, the ecological water requirement per unit area of grassland-gravel loam was the lowest, about 366.34 mm, the difference between the maximum value and the lowest value was about 293.26 mm; on the scale of eco-envi-

收稿日期:2020-01-19

修回日期:2020-03-05

资助项目:国家自然科学基金(41471452);中央高校基本科研业务资助项目(300102269201,300102299206,300102269205);内江师范学院校级科研项目(2019YB04)

第一作者:钟旭珍(1990—),女,四川泸州人,硕士研究生,研究方向为 GIS 与资源评价。E-mail:904213389@qq.com

mental function zoning, the wider the distribution of forest land, cultivated land, and grassland in the functional area, the greater the ecological water demand, among which the smallest ecological water requirement per unit area is the ancient city protection area, and the smallest total ecological water demand is the river protection area; the largest ecological water requirement per unit area is the vegetation protection area in 2015 and 2025, the largest ecological water demand per unit area in 2020 is the water conservation area, and the largest total ecological water demand in each evaluation year is the vegetation protection area. This study shows that ecological water demand is closely related to land use patterns and ecological function zoning.

Keywords: functional zoning of ecological environment; CA-Markov model; vegetation-soil complex system; ecological water demand; Guanzhong-Tianshui Area

生态需水量是指维持某一环境功能或环境目标所需要的水资源量。对于生态需水的概念,大多数学者认为生态需水量是保障生态系统基本功能正常运行的最小水资源量^[1-2]。针对不同的研究对象,生态需水的研究方法具有差异性^[3]。如姜田亮等^[4]结合0.618法、去极值法和间接计算法对于旱区天然植被生态需水量的参数进行研究。李咏红等^[5]对同一项工程中不同阶段不同保护目标下河道内生态需水量进行计算。岳东霞等^[6]结合遥感和GIS技术,计算了疏勒河流域近20a生态承载力和天然植被生态需水量,并探讨了二者的时空耦合关系。赵亮生等^[7]采用Tontana法、水量平衡方程及标准定额法计算了洮河国家级自然保护区生态功能的最小生态需水、适宜生态需水,并结合水资源承载力模型,分析了研究区水资源的可承载人口数量。马龙龙等^[8]利用SEBAL模型对盐池县的蒸散演变及生态需水规律进行研究。Nouri等^[9]以澳大利亚为研究区,利用WU-COLS方法对城市景观需水量进行计算。Surendran等^[10]利用CROPWAT 8.0软件研究了不同农业生态区的不同作物需水量。

综上所述,目前有关生态需水的研究已相对丰硕,部分学者从生态需水与生态承载力、水资源承载力、景观格局^[11]等的关系进行探讨,部分学者对植被生态需水进行了预测,还有一些学者研究植被生态需水管理系统等^[12];但基于生态功能分区的植被—土壤复合系统生态需水进行测评的研究却相对较少,且很少有学者结合预测模型对地表覆被进行预测,测算未来规划年份生态功能区生态需水;实际中,不同地区的生态条件存在差异性,其存在的生态问题和发挥的生态服务功能也不同^[13-14]。我国西北地区存在生态环境先天脆弱和水资源短缺的状况,对其开展基于生态功能分区的生态需水研究,对区域生态功能的保护和发展,水资源的合理分配和利用都将产生巨大的帮助作用,也会对社会、经济和环境的协调可持续发展产生积极的促进作用。然而,至今对该地区生态需

水展开研究的成果却相对较少。

为实现该地区生态需水较准确的计算及预测,研究根据生态需水的定义,对研究区的生态功能进行分区评价,并基于评价结果对各功能区的生态需水现状进行测算;同时,为了解该地区生态需水未来的发展趋势,研究又结合CA-Markov模型对其进行预测分析;以期为该地区生态规划措施的制定提供参考依据。

1 研究区概况

关中一天水区地跨陕西省关中地区和甘肃省东部的天水市,共8个区、市,地理坐标为104°—110°E, 33°—35°N,面积约为 $7.98 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。南边倚靠秦岭,北边以北山为界,西到甘肃天水市,东抵陕西潼关,地势南北高中部低,自西向东倾斜,海拔为400~3 700 m,地貌类型多样,有河谷、山地、黄土丘陵等。目前研究区面临着如水土流失、水资源短缺等生态环境问题,有必要开展基于生态环境功能分区的生态需水研究。

2 数据来源及处理

2.1 数据来源

研究数据包 Landsat ETM+/OLI, DEM, MODIS NDVI等遥感影像数据,来源于地理空间数据云;1:250万陕西土壤质地类型图,来源于《陕西土壤》;1:1 400万中国土壤质地图,来源于《中国土壤图集》;1:100万中国土壤数据库,来源于中国科学院南京土壤研究所;研究区及周边28个气象站的气象数据等,来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)。

2.2 数据处理

基于ENVI软件,结合监督分类和人工目视解译,将研究区遥感影像解译为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地6类土地利用类型^[15];基于GIS软件,利用研究区数字高程模型(DEM),提取流域边界;选用像元二分模型,利用NDVI月合成数据,计算植被覆盖度;气象数据和土壤相对湿度数据用来计算生态需水。

3 生态环境功能区

3.1 生态环境功能区指标体系

根据生态功能分区的相关原则^[14],并在综合分析该地区自然环境和人文环境的基础上,选择植被覆

盖度、干燥度指数、河道、土地利用方式、水源地等自然环境因子和古城等人文环境因子,依据全国自然地理各指标分区标准,同时结合研究区特征,制定了研究区的生态环境功能区指标体系^[14],具体情况详见表 1。

表 1 生态环境功能区指标体系

目标	指标	指标评价
生态环境 功能分区	土地利用方式	根据研究区土地利用方式,将耕地范围划分为农业种植区
	植被覆盖度	利用 NDVI 计算植被覆盖度,将植被覆盖度>60%的区域划分为植被保护区
	干燥度指数	利用研究区的年均气温和降水量计算 de Martonne 干燥度,将干燥度<30 的区域划分为防旱抗旱区
	河道	根据研究区的河流水系矢量图,一级河流(黄河)及其 5 km 缓冲区、二级河流(渭河)及其 3 km 缓冲区为高敏感区
		一级河流 5~10 km 缓冲区、二级河流 3~8 km 缓冲区、三级河流 3 km 缓冲区、四级河流 2.5 km 缓冲区为中敏感区
		一级河流 20 km 内、二级 15 km 内、三级河流 8 km 内、四级 5 km 内的剩余区域及五级河流 2.5 km 缓冲区为低敏感区
		非水域为不敏感区,将高敏感区确定为河道保护区
	水源地	依据 2017 年国家发展改革委办公厅新增的国家重点生态功能区类型,将洛南县划分为水源涵养区,保持与上级分区统一
	古城	西安,古称长安,是国务院公布的首批国家历史文化名城,是世界四大古都之一,根据古城的发展定位,建议进行分区保护,因此将其主城区划分为古城保护区

3.2 生态环境功能区结果

根据生态环境功能区指标体系,分别对每个因子进行评价,得到单因子评价结果。基于单因子评价结果进行生态功能区划分,在划分过程中,对于生态功能重叠的地区,主要依据生态功能的重要性原则和主导性原则进行归并,同时结合流域界限或行政界限对重叠区域边界进行调整,即当生态功能区划边界接近行政边界时,应努力协调行政边界,以确保行政区域的空间连续性,以便于行政区的综合规划和管理。最终将研究区划分为 6 大生态功能区(图 1)。

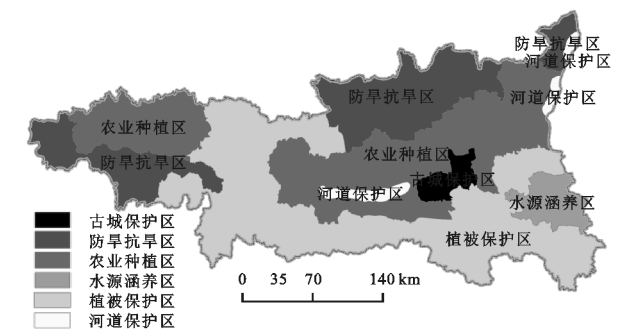


图 1 关中一天水区生态环境功能区

从图 1 可以看出,农业种植区主要分布于天水市北部和关中平原,面积约为 2.58 万 km²,占研究区总面积的 32.3%,要提高耕地质量,合理调整农业产业结构,科学地开发农业种植地区;植被保护区主要分

布于研究区南部秦岭地区,面积约为 3.03 万 km²,地区面积占比为 37.9%,要重点保护原生森林,加强造林绿化,保护生物多样性;防旱抗旱区主要分布于天水市南部、白水县、韩城市、咸阳市北部和铜川市北部等区域,面积约为 1.75 万 km²,面积占比为 22%,应合理利用水资源,选用需水较小耐旱性较强的作物,控制区域干旱化;河道保护区主要分布于黄河 5 km 缓冲区和渭河 3 km 缓冲区,面积约为 0.16 万 km²,仅占该地区总面积的 2%,要加强河道水污染的治理和两岸的水土保护工作;水源涵养区主要分布于洛南县,面积约为 0.3 万 km²,面积占比为 3.7%。洛南县森林覆盖率达到 90%以上,要加强建设水土保持林和水源涵养林,提高其生态服务和水源涵养功能;古城保护区主要分布于西安市主城区内,面积约为 0.17 万 km²,面积占比为 2.2%,要保护和发扬古城传统文化,提高城市发展质量。

4 基于生态环境功能分区的生态需水测评

4.1 生态需水测评模型

4.1.1 植被生态需水测评模型 影响植被蒸散水平的主要因素包括气候条件、土壤和植被生长状况等。研究选用的植被生态需水量测评模型为:

$$W_p = E_p \times A_p = (ET_0 \times K_c \times K_s) \times A_p \quad (1)$$

式中: W_p 为植被生态需水(m^3); E_p 为植被蒸散量(mm); A_p 为植被分布面积(m^2); ET_0 为参考作物潜在蒸散量(mm); K_c 为植被系数; K_s 为土壤水分限制常数。研究采用植被在生长期各月蒸散量的最小值来计算植被最小生态需水。

4.1.2 土壤生态需水测评模型 对于不同的区域,如果植被不是完全覆盖,那么只有植被生长下的土地的土壤含水量,才是真正意义上的土壤需水量。故利用 GIS 叠加分析工具对植被类型分布图和土壤质地分布图进行处理,得到植被—土壤类型分布图。研究选用的土壤生态需水测评模型为:

$$W_s=a_s\times H_s\times A_s$$
 (2)

式中: W_s 为土层深度 H_s 下的土壤需水(m^3); a_s 为植被区土壤含水定额(m^3/m^3); H_s 为土层深度(m);

A_s 为植被区面积(m^2)。植被的生长阻滞含水量是指能够维持植物生存和基本生长所需要的土壤最小含水量。参考相关土壤文献^[16-18],根据杨志峰等^[19-20]对黄河流域植被生态需水的研究,以土壤含水量占土壤田间持水量的 55% 来确定土壤的最小需水等级,由于渭河流域为黄河流域的二级子流域,同时结合课题组野外采集土壤样本经烘干法测得不同土壤质地含水量,计算结果和文献资料里的土壤田间含水量接近,所以研究取田间持水量的 55% 作为土壤的最小含水定额来计算土壤最小生态需水^[21-22]。

4.1.3 植被—土壤复合系统生态需水量测评结果与分析 根据选用的生态需水测评模型,计算得到关中一天水区植被—土壤复合系统在生长期多年平均单位面积最小生态需水量(表 2)。

表 2 关中一天水区植被—土壤复合系统生长期最小生态需水 mm

生长期	耕地— 壤土	耕地— 砂壤土	耕地— 黏壤土	耕地— 砂砾质壤土	林地— 壤土	林地— 砂壤土	林地— 黏壤土	林地— 砂砾质壤土	草地— 壤土	草地— 砂壤土	草地— 黏壤土	草地— 砂砾质壤土
4 月	34.540	33.730	35.620	32.630	48.300	47.880	49.620	47.820	28.000	27.570	29.060	27.500
5 月	58.260	56.880	60.150	55.070	86.410	85.650	88.780	85.800	42.050	41.430	43.650	41.390
6 月	65.380	63.830	67.480	61.800	96.360	95.570	98.820	95.430	52.360	51.560	54.300	51.470
7 月	64.190	62.670	66.200	60.640	84.310	83.570	86.550	83.870	59.320	58.420	61.560	58.370
8 月	61.940	60.480	63.890	58.530	77.090	76.430	79.060	76.430	58.020	57.160	60.180	57.010
9 月	44.130	43.100	45.500	41.690	53.870	53.420	55.180	52.770	41.160	40.520	42.690	40.500
10 月	28.230	27.570	29.100	26.640	35.790	35.500	36.590	35.710	24.470	24.100	25.400	24.100
合计	488.670	447.260	532.940	396.270	614.130	577.020	659.60	543.830	437.380	399.760	481.840	366.340

结合表 2 分析可知,植被—土壤复合系统的最小生态需水是先增加后减少的趋势,生态需水较高的时期主要出现在每年的 6—8 月,这和作物的发育生长阶段相一致。研究区北部北山及南部秦岭地区是高度生态需水的主要集中区域,低度生态需水的区域相间分布于区域河流两侧,其中天水中、北部地区较为集中。高度生态需水的地区主要为与林地组合的各类景观类型,其中林地—黏壤土的生态需水量最大,约为 659.60 mm,比最低的景观类型单位面积最小生态需水多 293.26 mm。中度生态需水的景观类型主要为草地—壤土、草地—黏壤土、耕地—砂壤土、耕地—壤土、耕地—黏壤土,其单位面积生态需水介于 437.38~532.94 mm。草地—砂壤土、耕地—砂砾质壤土、草地—砂砾质壤土的单位面积最小生态需水均低于 400 mm,其中草地—砂砾质壤土最低,约为 366.34 mm。

4.2 基于 CA-Markov 模型的土地覆被空间分布预测结果与分析

元胞自动机(CA, Cellular Automata)是一种能实现巨复杂系统时空演变过程模拟的数学模型^[23],马尔可夫模型(Markov Model)通过利用系统已有离散状态的经验传递概率来实现其未来发展状况的模拟预测^[24-25]。将 CA 和 Markov 组合为 CA-Markov

模型,可以实现对土地利用的数量结构及空间分布进行准确预测^[26]。

研究基于 IDRISI 17.0 软件中的 CA-Markov 模型,以 2010 年、2015 年数据为基础计算其概率矩阵,迭代系数取 10,过滤器为 5×5,完成研究区 2020 年和 2025 年土地利用空间分布的预测(图 2),各年份土地利用类型面积见表 3,并利用 ArcGIS 的分区统计功能,统计得到不同景观类型和不同生态功能区的生态需水(表 4)。

2010—2025 年期间,关中一天水经济区土地利用面积减少的有耕地、草地、未利用地,土地利用面积逐年增加的有林地、建设用地、水域,变化幅度较大的为耕地、林地、草地和建设用地^[26]。其中耕地面积减少了 8 503 km²,这与国家退耕还林政策的实施和城市化的发展有关^[27]。林地面积增加了 7 982.58 km²,主要原因在于各重要森林保护区和渭河整治绿化工程的建设。建设用地面积增加了 3 847.78 km²,主要分布于河流两岸和西安等大中城市周边。水域面积略有增加,这与各调水工程和人工水库的修建有关。草地面积减少了 3 324.95 km²,增加的耕地、林地和建设用地主要来源于草地的转换。未利用地面积逐渐减少,表明区域土地利用开发效率不断增强。

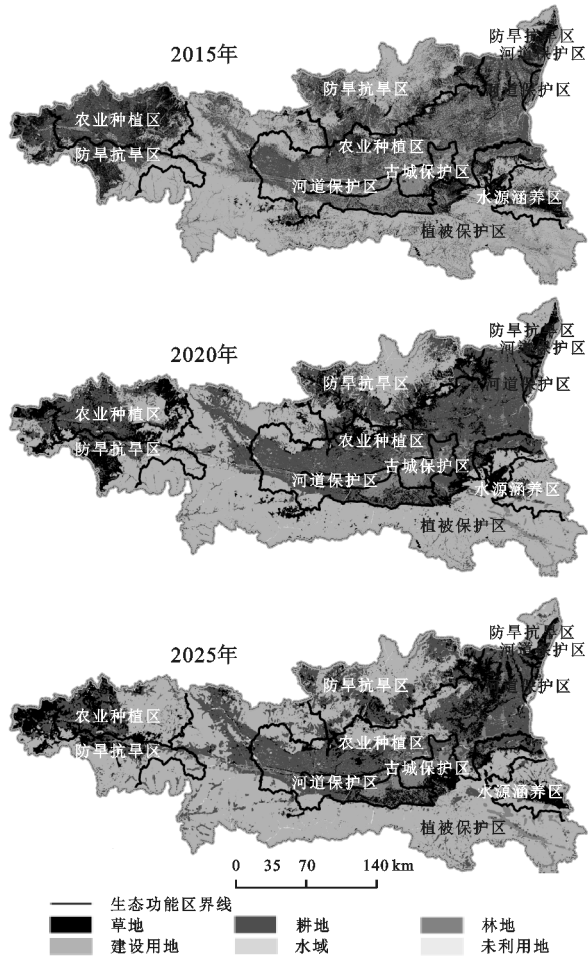


图 2 2015—2025 年关中—天水区土地利用空间分布模拟结果与生态功能类型分布

表 3 2010—2025 年土地利用类型面积 km²

土地利用类型	2010 年	2015 年	2020 年	2025 年
耕地	28868.370	24265.170	23611.790	20365.370
林地	31838.210	35951.160	36600.470	39820.790
草地	15225.610	13928.340	12900.590	11900.660
水域	611.920	626.080	681.980	755.240
建设用地	3168.360	5000.920	6017.840	7016.140
未利用地	207.770	148.560	107.570	62.050
总面积	79920.240	79920.240	79920.240	79920.240

根据图 2 分析可知,生态功能区的分布与土地利用方式密切相关。植被保护区和水源涵养区分布的地区主要为林地,农业种植区分布的地区主要为耕地,河道保护区分布的地区主要为水域,古城保护区分布的地区主要为建设用地,防旱抗旱区在耕地、林地、草地等都有分布。这表明生态功能区的生态需水与土地利用方式存在相关性。

4.3 基于生态环境功能分区尺度的生态需水量测评结果与分析

基于测算的植被—土壤系统多年平均生态需水量,利用 ArcGIS 的分区统计功能,以 CA-Markov 模型模拟预测的 2020 年、2025 年土地利用空间分布作为输入图层,以植被—土壤系统平均生态需水量栅格数据作为赋值图层,统计得到 2020 年、2025 年土地利用空间分布变化后的生态需水量,再以该图层作为赋值栅格,以生态环境功能区作为输入图层,统计得到不同生态功能区的生态需水量(图 3)。

表 4 关中—天水区生态环境功能分区面积及最小生态需水

功能区	面积/km ²	生态需水强度/mm			生态需水总量/10 ⁶ m ³		
		2015 年	2020 年	2025 年	2015 年	2020 年	2025 年
河道保护区	1605.55	326.96	387.11	390.08	524.95	621.52	626.30
古城保护区	1737.76	251.04	369.02	378.26	436.25	641.27	657.33
水源涵养区	2970.73	480.09	495.62	484.09	1426.21	1472.34	1438.11
防旱抗旱区	17536.8	496.83	481.47	480.75	8712.81	8443.51	8430.87
农业种植区	25782.04	441.62	453.20	458.26	11385.79	11684.39	11814.85
植被保护区	30287.36	515.46	495.19	491.74	15611.92	14997.97	14893.54

由表 4 可知,不同年份生态功能区的生态需水略有差异,从单位面积生态需水量来看,测评的 3 个年份中,古城保护区的单位面积生态需水量是最小的,原因在于古城保护区主要分布于西安城区,土地利用类型主要为建设用地,本研究未测评建设用地和水域的生态需水,其生态需水是留空白的,因此生态需水量小;植被保护区的单位面积生态需水量最大,原因在于林地的单位面积生态需水量是各种土地利用方式当中最大的,而植被保护区主要分布的植被类型为林地,因此生态需水量大;值得注意的是 2020 年单位面积生态需水量最大的为水源涵养区。由图 2 可知,

2020 年水源涵养区相比 2015 年、2025 年其林地覆盖面更广,而对应的 2020 年植被保护区内有更多的林地转换为了其他用地类型,因此,植被保护区单位面积生态需水量变小了,但比水源涵养区的单位面积生态需水仅小了 0.43 mm。

从生态需水总量来看,测评的 3 个年份中,生态需水总量从小到大依次为:河道保护区、古城保护区、水源涵养区、防旱抗旱区、农业种植区、植被保护区,这与各功能区的面积顺序保持一致。结合图 2 分析可知,河道保护区和古城保护区主要分布的土地利用类型为水域和建设用地,因此生态需水量小;而植被

保护区主要分布的土地利用类型林地,且又是各功能区中面积最大的,因此其生态需水总量最大。

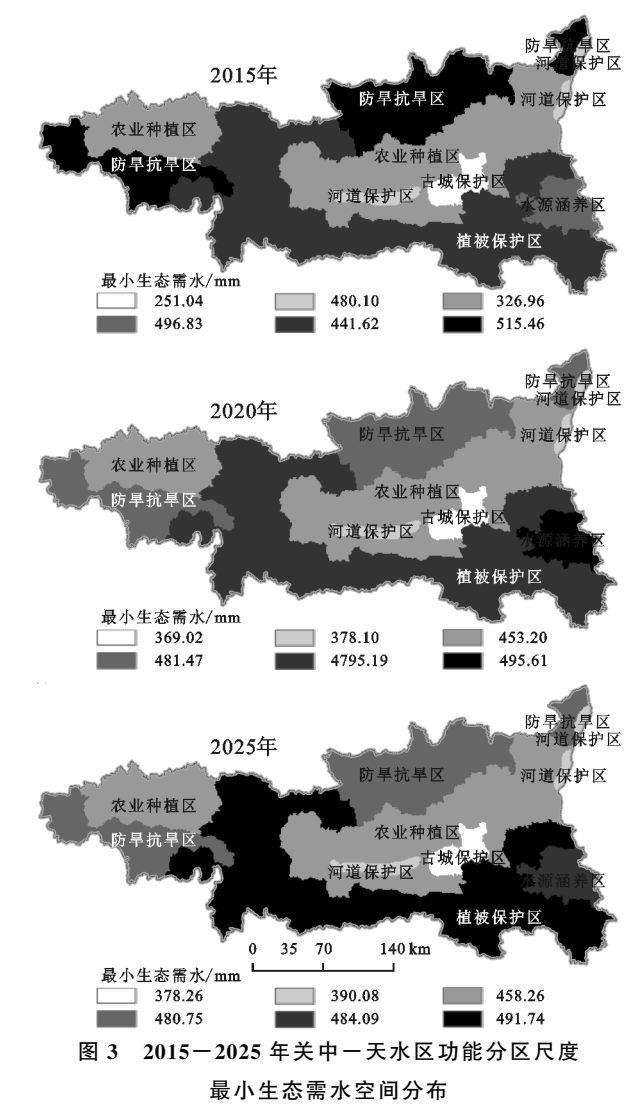


图 3 2015—2025 年关中一天水区功能区尺度
最小生态需水空间分布

5 结论

关中一天水区生态功能区可划分为河道保护、防旱抗旱和农业种植等主要 6 类;林地—黏壤土和草地—砂砾质壤土分别为单位面积生态需水的最大和最小两端;各功能区内,林地、耕地、草地越广,生态需水量则越大;预测结果显示,植被保护区的单位面积生态需水量在 2015 年和 2025 年均最大,水源涵养区的单位面积生态需水量则在 2020 年达到最大值,但各年份植被保护区生态需水总量均为最大。

研究以生态功能分区为背景进行生态需水测评,打破了传统的以行政区划为背景的研究,并测评了未来年份生态需水量,将生态功能区—土地利用方式—生态需水有机结合起来,分析研究区不同土地利用方式不同生态功能背景下的生态需水时空分布特征,测评结果可为相关部门对具有不同生态功能的地区进

行针对性的水土资源利用和生态环境整治提供科学依据。需要指出的是,基于土地利用预测模型和生态功能分区的生态需水测评处于探索性阶段,还存在一些问题需要深入思考和完善。如:(1)生态功能分区需要考虑的因素较多,研究针对性的选取区域生态环境敏感因子构建指标体系,相关研究中,如何针对不同地区,综合考虑生态系统服务功能,建立科学合理的生态功能分区指标体系仍是研究难点之一;(2)分区指标阈值界定及技术实现问题,针对不同地区确定指标阈值需考虑区域差异性;(3)生态需水等级性及未来年份生态需水的准确测定问题,考虑到篇幅问题,研究仅测评了最小生态需水,实际上,还可划分适宜生态需水、饱和生态需水等。此外,由于植被、土地利用方式等具有时空变化性,研究基于多年平均生态需水量来测算未来年份生态需水,如何探寻更为准确合理的方法来测算未来年份植被生态需水和土壤生态需水等问题有待进一步研究。

参考文献:

[1] 马亚强.柴达木盆地生态需水量研究[D].西安:长安大学,2019.

[2] 黄奕龙,张利萍.基于鱼类栖息地法的城市河流生态需水评估:以深圳市观澜河为例[J].环境污染与防治,2016,38(8):55-58.

[3] 李金燕.宁夏中南部干旱区域生态环境需水理论、方法与实践研究[M].江苏徐州:中国矿业大学出版社,2015.

[4] 姜田亮,张恒嘉,马国军,等.旱区植被生态需水量间接法计算参数的研究[J].水资源与水工程学报,2019,30(1):254-260.

[5] 李咏红,刘旭,李盼盼,等.基于不同保护目标的河道内生态需水量分析:以琉璃河湿地为例[J].生态学报,2018,38(12):4393-4403.

[6] 岳东霞,陈冠光,朱敏翔,等.近 20 年疏勒河流域生态承载力和生态需水研究[J].生态学报,2019,39(14):5178-5187.

[7] 赵亮生,邱书志,薄乖民,等.洮河国家级自然保护区生态需水与水资源承载力评价研究[J].西北林学院学报,2019,34(1):192-197.

[8] 马龙龙,杜灵通,宫菲,等.基于 SEBAL 模型的农牧交错区蒸散演变及生态需水规律[J].水土保持通报,2019,39(4):177-183.

[9] Nouri H, Beecham S, Kazemi F, et al. A review of ET measurement techniques for estimating the water requirements of urban landscape vegetation[J]. Urban Water Journal, 2013,10(4):247-259.

[10] Surendran U, Sushanth C M, Mammen G, et al. Modelling the crop water requirement using FAO-CROPWAT and assessment of water resources for sustain-

- able water resource management: A case study in Palakkad District of Humid Tropical Kerala, India[J]. Aquatic Procedia, 2015, 4: 1211-1219.
- [11] 姜亮亮, 包安明, 刘海隆, 等. 玛纳斯流域生态需水变化与景观格局的响应关系研究[J]. 水土保持研究, 2015, 22(3): 143-149, 351.
- [12] 段晋芳, 郭青霞, 解鸿志. 基于 GIS 的山西永定河植被生态需水管理系统的研建[J]. 水土保持研究, 2011, 18(1): 254-258.
- [13] 王丽霞, 任朝霞, 任志远, 等. 基于生态功能分区的陕北延河流域旱地系统生态需水测评[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 156-161.
- [14] 王丽霞, 钟旭珍, 刘招, 等. 关中—天水经济区生态环境功能分区研究[J]. 环境污染与防治, 2018, 40(7): 843-848.
- [15] 夏楚瑜. 基于土地利用视角的多尺度城市碳代谢及“减排”情景模拟研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [16] 李玉山. 黄土高原土壤水分循环与农田生产力[M]. 西安: 陕西人民出版社, 2015.
- [17] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [18] 杨培岭. 土壤与水资源学基础[M]. 北京: 水利水电出版社, 2005.
- [19] 杨志峰, 崔保山. 生态环境需水量理论、方法与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [20] 杨志峰, 刘静玲, 孙涛, 等. 流域生态需水规律[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [21] 薛天翼, 白建军. 基于 TVDI 和气象数据的陕西省春季旱情时空分析[J]. 水土保持研究, 2017, 24(4): 240-246.
- [22] 张娟. 基于 RS-GIS 的关中—天水区多尺度植被—土壤复合系统的生态需水测评[D]. 西安: 长安大学, 2018.
- [23] 任金铜, 莫世江, 陈群利, 等. 草海湿地区域土地利用/覆被变化与预测研究[J]. 信阳师范学院学报: 自然科学版, 2017, 30(3): 385-392.
- [24] 艾丽娅, 王少军, 张志. 1977—2017 年锡林郭勒盟中部草原植被覆盖时空演变及预测[J]. 水土保持通报, 2019, 39(5): 1-9.
- [25] Li X W, Dong Y Y, Zhao L, et al. Study on NDVI changes in Weihe Watershed based on CA-Markov model[J]. Geological Journal, 2018, 53(S2): 435-441.
- [26] 钟旭珍. 基于 GIS 的关中—天水经济区水土资源多情景配置方案模拟[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- [27] 易霞. 强震山区景观格局脆弱性时空动态与驱动力定量研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2019.

~~~~~

(上接第 239 页)

- [23] Wang H J, Chen Y N, Chen Z S. Spatial distribution and temporal trends of mean precipitation and extremes in the region, northwest of China, during 1960—2010 [J]. Hydrological Processes, 2013, 27(12): 1807-1818.
- [24] Yao J Q, Zhao Y, Chen Y N, et al. Multi-scale assessments of droughts: A case study in Xinjiang, China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 630: 444-452.
- [25] 张雪芹, 孙杨, 毛炜峰, 等. 中国干旱区气温变化对全球变暖的区域响应[J]. 干旱区研究, 2010, 27(4): 592-599.
- [26] 张彦龙, 刘普幸. 基于 AI 指数的新疆干湿时空变化及其影响因素分析[J]. 自然资源学报, 2016, 31(4): 658-671.
- [27] Li Z, Chen Y, Yang J, et al. Potential evapotranspiration and its attribution over the past 50 years in the arid region of Northwest China [J]. Hydrological Processes, 2014, 28(3): 1025-1031.
- [28] Chen Y N, Deng H J, Li B F, et al. Abrupt change of temperature and precipitation extremes in the arid region of Northwest China[J]. Quaternary International, 2014, 336: 35-43.
- [29] 刘加珍, 李卫红, 陈永金, 等. 孔雀河下游衰退河岸林的沙漠化分析[J]. 聊城大学学报: 自然科学版, 2018(1): 65-71, 103.
- [30] Qin Y H, Li B F, Chen Z S, et al. Spatio-temporal variations of nonlinear trends of precipitation over an arid region of northwest China according to the extreme-pointsymmetric mode decomposition method [J]. International Journal of Climatology, 2017, 38(5): 2239-2249.
- [31] Zhang J Y, Chen Y N, Li Z. Assessment of efficiency and potentiality of agricultural resources in Central Asia[J]. Journal Geographical Sciences, 2018, 28(9): 1329-1340.