

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

王丽霞¹, 任朝霞¹, 任志远², 马超群¹

(1. 长安大学地球科学与资源学院, 西安 710054; 2. 陕西师范大学旅游与环境学院, 西安 710062)

摘要: 该文以延河流域旱地系统为研究对象, 选取具有生态学和水文学意义的指标, 建立流域生态功能分区指标体系, 应用“3S”技术, 划分流域生态功能分区。在此基础上, 运用相应的数学模型, 对各分区旱地系统的生态需水及其空间分布特征进行测评和分析。结果表明, 延河流域基本划分为防风固沙区、防旱抗旱区、水土保持区、农业种植区和植被保护区等五大生态功能分区。景观尺度上, 有林地-黏壤土的单位面积生态需水最大, 约为 502.31 mm/a; 牧草地-砂壤土的单位面积生态需水最小, 约为 300.01 mm/a。生态功能分区尺度上, 植被保护区的单位面积生态需水最大, 约为 357.72 mm/a, 防旱抗旱区的单位面积生态需水最小, 约为 304.73 mm/a。该研究为明确流域水生态环境保护目标以及水土资源的利用方向和生态整治重点提供科学依据。

关键词: 功能分析, 生态, 水分, 植被, 生态功能分区, 旱地系统, 生态需水, 延河流域

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.06.026

中图分类号: X705

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-06-0156-06

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.
Wang Lixia, Ren Zhaoxia, Ren Zhiyuan, et al. Evaluation to ecological water requirement of dry land system based on ecological function zones in Yanhe watershed[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(6): 156-161. (in Chinese with English abstract)

0 引言

20 世纪 90 年代以来, 生态水文学迅速发展并逐渐成为相对独立的学科^[1-3]。其中生态需水问题是该学科研究的前沿领域和核心内容之一^[4-5]。生态需水是指在特定的尺度和环境标准下, 为维持生态系统健康和水资源可持续利用所必须保证的水量, 具有时空尺度、阈值性和等级性^[6-7]。目前, 国内外生态需水研究通常按照生态系统的组合类型, 将流域划分为旱地系统、湿地系统及河口系统等 3 个生态水文模块^[8], 并对系统中某一生态类型(如林地、河流、湖泊等)的需水量及其时空分布特征进行测评^[9-14]。而实际中, 流域上、中、下游的生态背景有所差异, 所面临的生态环境问题和生态服务功能也存在空间异质性, 现有的研究无法适应以恢复完整性和可持续性生态系统健康为目标的流域生态管理的要求^[15]。因此, 系统开展基于功能分区的生态需水研究, 就显得十分迫切和重要。其有利于明确流域水生态环境保护目标以及水土资源的利用方向和生态整治重点, 从而实现跨界生态系统的管理。

文章以延河流域旱地系统为研究对象, 选取具有生态学和水文学意义的指标, 建立流域生态功能分区指标体系, 应用“3S”技术, 划分流域生态功能分区。在此

基础上, 运用相应的数学模型, 对各分区旱地系统的生态需水及其空间分布特征进行测评和分析。

1 研究区概况

延河发源于靖边县天赐湾乡周山, 由西北向东南流经志丹、安塞、宝塔、延长 4 县(区), 最终汇入黄河, 全长 286.9 km, 流域面积 7 680 km², 属于黄河一级支流。延河流域(36°27'~37°58'N, 108°41'~110°29'E)是黄河中游水土流失最严重的区域之一。其地势西北高而东南低, 平均海拔高度 950 m, 年均降水约 500 mm, 年均水面蒸发约 1 000 mm, 年均气温 9.2℃^[16]。以安塞县的化子坪和宝塔区的甘谷驿为界, 将流域划分成上、中、下游(图 1)。上游为梁峁丘陵沟壑区, 地形陡峭, 侵蚀剧烈,

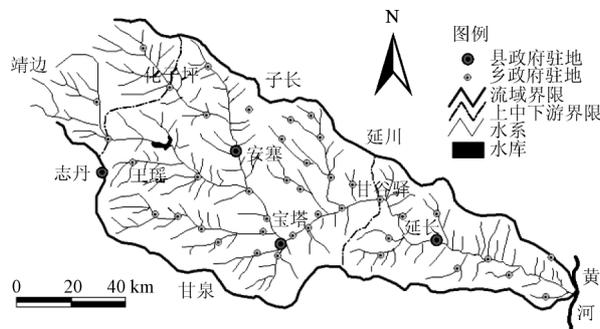


图 1 延河流域行政区划图

Fig.1 Administrative map of Yanhe watershed

植被以乔木林和灌木林为主; 中游多为峁状丘陵沟壑区, 河谷展宽, 阶地发育, 植被以乔木林为主; 下游为破碎塬区, 冲沟发育, 植被以牧草地、园地以及乔木、灌木

收稿日期: 2011-06-27 修订日期: 2011-11-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41001374); 国家自然科学基金项目(41040011); 国家自然科学基金项目(31140042)

作者简介: 王丽霞(1979-), 女, 山西大同人, 博士后, 主要从事水资源评价与 GIS 研究。西安 长安大学地球科学与资源学院, 710054。

Email: wlx333@sina.com.cn

混合林为主。流域多年平均径流总量为 2.89 亿 m^3 ，径流年内分配很不均匀，年际变化大，多年平均输沙量为 0.82 亿 t，侵蚀模数为 1.12 万 t/km^2 。许多地区，由于赋存于天然水体中的水量达不到生态环境的需水标准，已引发了诸如植被退化、水土流失、土地沙化、河道萎缩、水质下降等一系列生态环境问题。

2 数据来源及处理

2.1 数据资料来源

研究中选用的影像资料包括延河流域 1:5 万数字高程模型 DEM (digital elevation model) 和 Landsat ETM+ 数据 (2005 年)。专题数据包括延安地区 1:10 万土壤侵蚀分布图 (2000 年) 和陕西省 1:50 万土壤类型图 (1996 年)。实测数据包括流域主要气象站点连续 30 a (1975—2004 年) 的气象资料 (经纬度、海拔高度、月平均降水量、月平均气温、月平均水汽压、月平均风速等)，和土肥站点连续 10 a (1995—2004 年) 的土壤含水实测资料。

2.2 数据资料处理

DEM 数据用于提取流域边界。在 ArcView3.3 平台下，以 DEM 作为输入数据，运用“Hydrologic Functions”

功能生成集水流域和水流网络数据，而后对 DEM 进行填洼处理，计算水流方向 (flow direction) 和流水累计量 (flow accumulation)，并生成 Watershed 数据^[17]。

遥感影像用于提取流域土地利用信息。在 Erdas9.2 平台下，根据研究需要，采用监督分类与非监督分类相结合的方法，将土地利用类型划分为耕地、园地、有林地、灌丛林、牧草地、水域、建设用地和未利用地。

气象数据和土壤含水资料用于计算流域旱地系统的生态需水。

3 生态需水功能分区

3.1 生态需水功能分区指标体系

本文从影响流域生态需水的主导因素出发，选取具有生态学和水文学意义的指标，建立分区指标体系 (表 1)。一级分区是根据延河流域的自然地理特征，如地形地貌、河段特征等，划分为上、中、下游。二级分区是选择反映流域生态需水功能的主要指标，包括植被覆盖率、土壤侵蚀模数、平均风速、土地利用方式和年干燥度指数等，并依据全国自然地理各指标的分区标准确定阈值^[18]，划分功能分区。

表 1 延河流域生态需水功能分区指标体系

Table 1 Index system for zoning ecological water requirement in Yanhe watershed

目标层	要素层	指标层	指标性质	指标描述
生态分区	地形地貌	地貌类型	定性、离散	地貌类型和海拔高度可以塑造河段形态，体现河段生态特征和水文特征。
		海拔高度	定量、连续	
	水文特征	年径流深度	定量、连续	径流深表征区域地表水资源的丰欠程度。
		河段分布	定性、离散	河段划分体现上、中、下游以及源头区与河口区的不同河段特征。
	生态需水功能	植被覆盖率	定量、离散	覆盖率 > 60% 的区域划分为植被保护区。
		土壤侵蚀模数	定量、连续	侵蚀模数 > 1 000 t/km^2 的区域划分为水土保持区。
		年均风速	定量、离散	年均风速 ≥ 4.0 m/s 的区域划分为防风固沙区。
		土地利用方式	定性、离散	根据作物覆盖类型确定农业种植区。
		年干燥度指数	定量、连续	干燥度指数 > 3.0 的区域划分为防旱抗旱区。

3.2 生态需水功能分区步骤

植被覆盖度与归一化植被指数 NDVI (normalized difference vegetation index) 具有一定的相关性^[19-20]，利用遥感影像提取流域 NDVI 指数，而后按照回归方程计算出植被覆盖度，并将植被覆盖度 > 60% 的区域划分为植被保护区。土壤侵蚀模数是根据延河流域土壤侵蚀分布图数字化得到的，并将侵蚀模数 > 1 000 t/km^2 的区域划分为水土保持区。年均风速是根据延河流域主要气象站点多年的平均风速月份统计资料，在 ArcGIS9.2 平台下，采用 Kringing 插值方法获得的，并根据流域风速与起沙特点 (当风速达到 4~5 m/s 的时候，地表的干沙就可以被扬起)，将年均最大风速 ≥ 4.0 m/s 的区域划分为防风固沙区。土地利用方式是通过解译遥感影像获得，并将农作物主要覆盖区域划分为农业种植区。年干燥度指数为蒸散量与降水量之比，采用 Kringing 插值方法获得，并将干燥度指数 > 3.0 的区域划分为防旱抗旱区。

3.3 生态需水功能分区结果

生态需水功能分区结果如图 2 所示。可以看出，防风固沙区主要分布在流域西北部的上游地段，面积为

838.72 km^2 ，区域风蚀沙化现象严重，整治重点是退耕还草，营造防风固沙林，防治土地沙化。防旱抗旱区主要分布在流域北部的上、中游地段，面积为 785.65 km^2 ，区域降水量少，蒸发量大，整治重点是合理利用牧草地资源，选用蒸散较小的耐旱植被涵养水源，控制土壤干旱化。水土保持区沿延河干流广布于流域的上、中、下游河段，面积为 2 780.21 km^2 ，区域生态保护目标为退耕还草，营造水土保持林，严禁过度放牧，合理规划实施小流域综合治理工程，防治水土流失。农业种植区有 2 个部分，一个主要在流域南部的上、中、下游河段，另一个位于流域下游河口区，总面积为 1 634.99 km^2 ，整治重点是提高耕地质量，防治土壤次生盐碱化。植被保护区分布在流域南部的上、中、下游河段，面积为 1 640.15 km^2 ，整治重点是保护现有植被，封山绿化，营造水土保持林和水源涵养林。

4 基于功能分区的流域旱地系统生态需水测评

4.1 旱地系统生态需水测评模型

旱地生态系统是流域中主要的生态系统类型及关键的结构功能模块。旱地生态需水受到植被类型、土壤类

型和生长期等条件的影响, 主要包括植被生态需水和土壤生态需水 2 项^[8]。由于生态需水具有等级性, 同时考虑到延河流域属于典型的干旱-半干旱地区, 水资源极为匮乏, 因此本文重点测算了旱地系统维持植被生存和基本生长所需的最小生态需水^[7]。

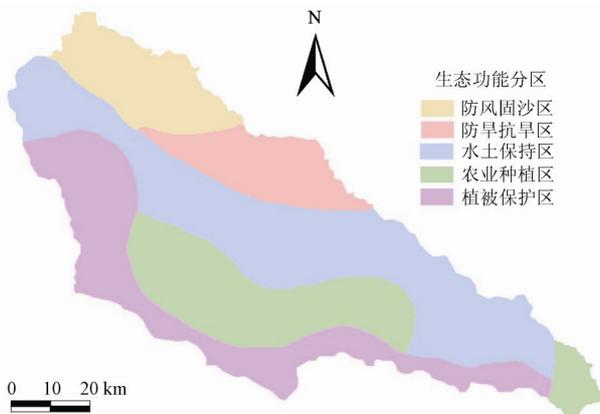


图 2 延河流域生态功能分区

Fig.2 Ecological function zones in Yanhe watershed

4.1.1 旱地植被生态需水测评

影响植被蒸散水平的主要因素有气候条件、土壤含水量和植被生长状况。本文在联合国粮农组织 (FAO) 作物系数法的基础上, 将土壤水分条件限制因素考虑进去, 并结合原始气象资料, 计算植被生态需水。模型表达为

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

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 为土壤水分限制系数。以上参数均可根据相应的计算公式求得^[8]。

由于计算的是植被最小生态需水, 因此文章中植被蒸散量采用植被在生长期各月蒸散量的最小值。具体求算方法是首先在 ArcGIS9.2 平台下, 采用 Kriging 方法分别对各气象站点连续 30 a 逐月平均的蒸散量进行内插, 然后在 Arcview3.3 平台下, 运用 Zonal Functions 功能, 对植被区中蒸散量的栅格数据进行分区汇总, 从而统计出逐月蒸散量的最小值、最大值、平均值及标准差等特征量^[21]。

4.1.2 旱地土壤生态需水测评

对于不同的区域, 如果植被不是完全覆盖, 只有支持植被生长的那部分土地的土壤含水, 才是真正意义上的土壤需水。本文在 ArcGIS9.2 平台下, 将植被类型分布图和土壤质地分布图由矢量数据转换为栅格数据, 空间分辨率为 $30 m \times 30 m$, 而后分别对 2 类栅格数据的属性表添加“code”字段, 以区分不同类别, 执行“map calculator”命令, 对植被类型和土壤质地的“code”栅格图进行乘积运算, 确保最终叠加类型的“Value”值具有唯一性 (图 3)。运用“Edit Tools”模块下的“Command Tools”功能, 执行“Conversion”命令将植被-土壤类型由栅格数据

转换为“Vector Coverage”的“Polygon”格式, 提取面积空间属性信息, 计算土壤需水量。模型表达为

$$W_s = \alpha_s \times H_s \times A_s \quad (2)$$

式中, W_s 为土壤深度 H_s 下的土壤需水量, m^3 ; α_s 为植被区土壤含水定额, m^3/m^3 ; H_s 为土壤深度, m ; A_s 为植被区面积, m^2 。

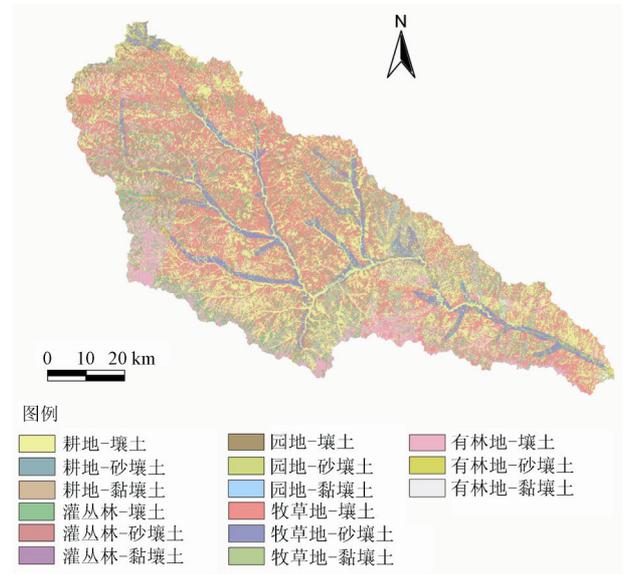


图 3 延河流域 2005 年的植被-土壤栅格图

Fig.3 Grid map of vegetation-soil in Yanhe watershed in 2005

植被生态需水主要是来自于土壤。根据土壤水分的保持和运动状态, 以及可被植物吸收利用的程度和数量等特征, 可将其划分为凋萎湿度、生长阻滞含水量、临界含水量和田间持水量等几种形式^[22]。其中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, 约占田间持水量的 40%~50%, 本文取田间持水量的 45%作为土壤的最小含水定额^[23]。

4.2 旱地系统生态需水测评结果

4.2.1 景观尺度的生态需水时空变化特征

流域旱地系统植被-土壤景观的单位面积最小生态需水测评结果如表 2 所示, 空间分布如图 4 所示。可以看出, 植被-土壤景观的生态需水主要集中在夏季 (6—8 月), 占到生长期生态需水总量的 42.57%。高度生态需水的区域主要位于流域南部的石质低山丘陵沟谷区, 低度生态需水的区域主要位于河谷阶地。高度生态需水的景观类型为有林地-黏壤土、有林地-壤土和有林地-砂壤土, 其中有林地-黏壤土的单位面积生态需水最大, 约为 $502.31 mm/a$, 是各景观类型单位面积平均生态需水的 1.29 倍。较高生态需水的景观类型为园地-黏壤土、园地-壤土和园地-砂壤土, 其单位面积的生态需水介于 $422.27 \sim 443.51 mm/a$ 。中度生态需水的景观类型为耕地-黏壤土、灌丛林-黏壤土和耕地-壤土, 其单位面积的生态需水介于 $358.27 \sim 371.17 mm/a$ 。较低生态需水的景观类型为灌丛林-砂壤土、灌丛林-壤土和耕地-砂壤土, 其单位面积生态需水介于 $337.15 \sim 349.57 mm/a$ 。低度生态需水的景观类型为牧草地-砂壤土、牧草地-壤土和牧草地-

黏壤土，其中牧草地-砂壤土的单位面积生态需水最小，约为 300.01 mm/a，是各景观类型单位面积平均生态需水的 0.77 倍。

表 2 延河流域植被-土壤景观生长期最小生态需水

Table 2 Minimal ecological water requirement of vegetation-soil system in Yanhe watershed

景观类型	景观面积 /10 ⁶ m ²	最小生态需水/mm							
		4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	全生长期
耕地-壤土	1329.99	27.20	45.42	50.97	50.04	48.29	34.75	24.70	358.27
耕地-砂壤土	220.10	27.20	45.42	50.97	50.04	48.29	34.76	24.70	349.57
耕地-黏壤土	61.17	27.19	45.46	51.00	50.03	48.29	34.73	24.68	371.17
园地-壤土	310.29	35.91	59.18	65.28	61.79	58.21	43.09	30.52	430.86
园地-砂壤土	44.08	35.97	59.22	65.42	61.83	58.23	43.08	30.67	422.27
园地-黏壤土	13.08	36.23	59.22	64.99	61.48	58.07	42.81	30.17	443.51
有林地-壤土	949.27	41.28	73.12	81.55	71.35	65.24	46.04	33.99	489.47
有林地-砂壤土	101.50	41.28	73.10	81.57	71.33	65.23	46.05	34.00	480.78
有林地-黏壤土	27.44	41.35	73.25	81.53	71.41	65.23	45.98	33.88	502.31
灌丛林-壤土	1027.70	26.50	41.97	48.92	49.68	47.29	33.70	20.86	345.82
灌丛林-砂壤土	125.11	26.50	41.96	48.92	49.67	47.30	33.71	20.85	337.15
灌丛林-黏壤土	29.54	26.44	41.99	49.05	49.77	47.38	33.73	20.94	358.65
牧草地-壤土	2362.19	21.21	31.54	39.27	44.49	43.52	31.18	20.60	308.71
牧草地-砂壤土	357.98	21.21	31.55	39.27	44.49	43.53	31.17	20.60	300.01
牧草地-黏壤土	108.77	21.21	31.55	39.24	44.49	43.49	31.16	20.60	321.58

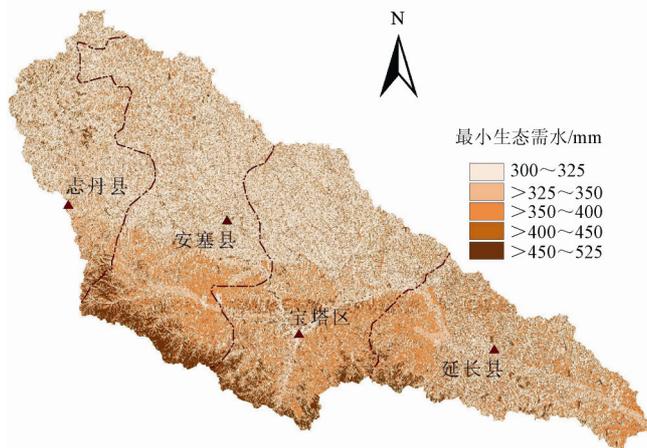


图 4 延河流域景观尺度最小生态需水空间分布
Fig.4 Spatial distribution of minimal ecological water requirement at landscape scale in Yanhe watershed

4.2.2 功能分区尺度的生态需水空间分布特征

在 ArcView3.3 平台下，运用空间分析模块中的“Tabulate Areas”命令，“Row Theme”选择生态功能分区矢量图层，“Column Theme”选择植被-土壤景观空间分布图，统计出各生态功能分区单元中的植被-土壤景观

类型面积以及最小生态需水（表 3）。

表 3 延河流域生态功能分区面积及最小生态需水

Table 3 Statistics of ecological function zones areas and minimal ecological water requirement in Yanhe watershed

	面积 /km ²	单位面积生态需水 /(mm·a ⁻¹)	生态需水总量 /(10 ⁶ m ³ ·a ⁻¹)
防风固沙区	760.68	313.57	238.53
水土保持区	2538.57	322.42	818.49
防旱抗旱区	697.69	304.73	212.61
植被保护区	1537.30	357.72	549.92
农业种植区	1532.29	339.51	520.23

比较单位面积各生态功能分区单元的最小生态需水（图 5），可以看出植被保护区（357.72 mm/a）>农业种植区（339.51 mm/a）>水土保持区（322.42 mm/a）>防风固沙区（313.57 mm/a）>防旱抗旱区（304.73 mm/a）。原因是植被保护区的地表覆被以有林地为主，其单位面积的生态需水最大。而防旱抗旱区的地表覆被以牧草地为主，其在该区中的面积占到防旱抗旱区总面积的 58.76%，而其单位面积的生态需水最小。

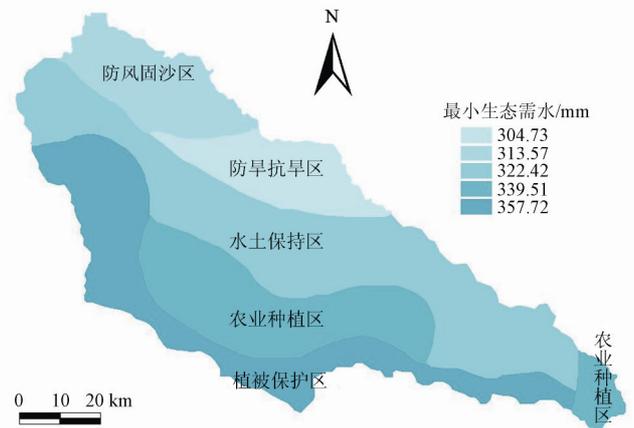


图 5 延河流域功能分区尺度最小生态需水空间分布
Fig.5 Spatial distribution of minimal ecological water requirement at functional division scale in Yanhe watershed

5 结论与讨论

5.1 结论

文章应用“3S”技术，通过对多源数据的融合处理，建立流域尺度的生态功能分区，并对各分区中旱地系统的生态需水及其时空分布特征进行测评和分析。研究得出的主要结论有：延河流域基本划分为 5 大生态功能分区，分别为防风固沙区、防旱抗旱区、水土保持区、农业种植区和植被保护区。景观尺度上，有林地-黏壤土的单位面积生态需水最大，约为 502.31 mm/a，是各景观类型单位面积平均生态需水的 1.29 倍；牧草地-砂壤土的单位面积生态需水最小，约为 300.01 mm/a，是各景观类型单位面积平均生态需水的 0.77 倍。生态功能分区尺度上，植被保护区的单位面积生态需水最大，约为 357.72 mm/a，防旱抗旱区的单位面积生态需水最小，约为 304.73 mm/a。

5.2 讨论

研究打破传统以行政区划为背景进行的区域尺度的生态需水测评,而以生态功能分区为背景进行流域尺度测评。区划结果能够体现相关政府部门、利益相关者以及公众协商的一致认可性。通过分析流域功能分区的生态需水及时空分布特征,可以为明确流域水生态环境保护目标以及水土资源的利用方向和生态整治重点提供科学依据。

需要指出的是基于功能分区的生态需水研究仍然处于探索性阶段,一些问题还有待深入思考和完善。

1) 生态功能分区的指标体系:构建基于生态功能分区的水资源评价指标体系较为复杂,原因是考虑的因素较多,包括水文特征、水质特征、地貌特征以及生物特征等等。文章中一级分区主要考虑了流域的自然地理特征,特别是水文特征,二级分区重点选择反映流域生态需水功能的指标。在相关研究中,如何针对不同的水资源测评目标构建合理的指标体系,仍是研究的难点之一。

2) 分区指标阈值界定及技术实现:文章中分区指标的阈值是依据全国自然地理各指标的分区标准,结合流域生态特征进行界定的,技术实现过程主要借助“3S”平台,对于生态功能重叠的单元按照影响生态需水的主导因素原则进行归并。在相关研究中,由于下垫面性质不同,确定生态分区指标阈值以及功能单元的划分原则,需要考虑流域在地域和尺度上的空间差异性。

3) 生态需水的等级性:考虑到研究区域属于干旱-半干旱地区,文章中仅仅测算了流域旱地系统的最小生态需水。实际中,水生态环境功能目标越高,生态需水的等级也越高。同时,目前对于植被蒸散量的阈值界定,尚无统一方法,文章借助 GIS 平台求算植被蒸散量的最小值,采用 30a 的气象资料具有统计意义,但探寻更为准确合理的界定方法仍有待深入研究。

[参 考 文 献]

- [1] 黄奕龙,傅伯杰,陈利顶.生态水文过程研究进展[J].生态学报,2003,23(3):581-587.
Huang Yilong, Fu Bojie, Chen Liding. Advances in ecohydrological process research[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(3): 581-587. (in Chinese with English abstract)
- [2] 王丽霞,任志远,孔金玲.延河流域河道需水动态变化分析[J].干旱区研究,2010,27(5):680-685.
Wang Lixia, Ren Zhiyuan, Kong Jinling. Study on dynamic change of river in-stream flow requirement in the Yanhe river basin[J]. Arid Zone Research, 2010, 27(5): 680-685. (in Chinese with English abstract)
- [3] 王根绪,刘桂民,常娟.流域尺度生态水文研究评述[J].生态学报,2005,25(4):892-903.
Wang Genxu, Liu Guimin, Chang Juan. Review on some issues of eco-hydrology research at the watershed scale[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(4): 892-903. (in Chinese with English abstract)
- [4] 张丽,李丽娟,梁丽乔,等.流域生态需水的理论及计算研究进展[J].农业工程学报,2008,24(7):307-312.
Zhang Li, Li Lijuan, Liang Liqiao, et al. Progress on the research of theory and calculation method of ecological water requirement[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(7): 307-312. (in Chinese with English abstract)
- [5] 栗晓玲,康绍忠.干旱区面向生态的水资源合理配置研究进展与关键问题[J].农业工程学报,2005,21(1):167-172.
Su Xiaoling, Kang Shaozhong. Research advances and key topics on optimal allocation of water resources based on ecosystem in the arid areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2005, 21(1): 167-172. (in Chinese with English abstract)
- [6] 张远,杨志峰.黄淮海地区林地最小生态需水量研究[J].水土保持学报,2002,16(2):72-75.
Zhang Yuan, Yang Zhifeng. Minimum ecological water requirement of forestland in Huanghuaihai area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 16(2): 72-75. (in Chinese with English abstract)
- [7] 赵文智,程国栋.干旱区生态水文过程研究若干问题评述[J].科学通报,2001,46(22):1851-1857.
Zhao Wenzhi, Cheng Guodong. Review on some issues of ecological water process in arid regions[J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(22): 1851-1857. (in Chinese with English abstract)
- [8] 杨志峰,刘静玲,孙涛,等.流域生态环境需水规律[M].北京:科学出版社,2006:73-113.
- [9] 潘兴瑶,刘洪禄,李法虎,等.基于GIS技术的北京通州区灌区生态需水研究[J].农业工程学报,2007,23(2):42-47.
Pan Xingyao, Liu Honglu, Li Fahu, et al. Ecological water requirement of irrigated region in Tongzhou district of Beijing based on GIS technique[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(2): 42-47. (in Chinese with English abstract)
- [10] 何永涛,李文华,李贵才,等.黄土高原地区森林植被生态需水研究[J].环境科学,2004,25(3):35-39.
He Yongtao, Li Wenhua, Li Guicai, et al. Ecological water requirement of forests in Loess Plateau[J]. Environmental Science, 2004, 25(3): 35-39. (in Chinese with English abstract)
- [11] 王西琴,张远,刘昌明.河道生态及环境需水理论探讨[J].自然资源学报,2003,18(2):240-246.
Wang Xiqin, Zhang Yuan, Liu Changming. A theoretical discussion of ecological and environmental water requirements of river course[J]. Journal of Natural Resources, 2003, 18(2): 240-246. (in Chinese with English abstract)
- [12] 唐克旺,王浩,刘畅.陕北红碱淖湖泊变化和生态需水初步研究[J].自然资源学报,2003,18(3):304-309.
Tang Kewang, Wang Hao, Liu Chang. Preliminary study of Hongjiannao Lake's variation and ecological water demand[J]. Journal of Natural Resources, 2003, 18(3): 304-309. (in Chinese with English abstract)
- [13] Martin P, Andras H. Conservation concept for a river ecosystem impacted by flow abstraction in a large

- post-mining area[J]. *Landscape and Planning*, 2000, 51(2): 165—176.
- [14] Sagehashi M. A predictive model of long-term stability after biomanipulation of shallow lakes[J]. *Water Research*, 2000, 34(16): 4014—4028.
- [15] 周丰, 刘永, 黄凯, 等. 流域水环境功能区划及其关键问题[J]. *水科学进展*, 2007, 18(2): 216—222.
Zhou Feng, Liu Yong, Huang Kai et al. Water environmental function zoning at watershed scale and its key problems[J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(2): 216—222. (in Chinese with English abstract)
- [16] 王丽霞, 任志远, 任朝霞, 等. 陕北延河流域基于 GLP 模型的流域水土资源综合配置[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(4): 48—53.
Wang Lixia, Ren Zhiyuan, Ren Zhaoxia, et al. Integrated allocation of water and land resources based on GLP model in Yanhe watershed[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2011, 27(4): 48—53. (in Chinese with English abstract)
- [17] 王丽霞, 任志远, 任朝霞, 等. 延河流域 NDVI 与主要气候因子的时空相关性研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(8): 88—93.
Wang Lixia, Ren Zhiyuan, Ren Zhaoxia, et al. The temporal and spatial correlations between NDVI and main climatic factors in Yanhe watershed[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2011, 25(8): 88—93. (in Chinese with English abstract)
- [18] 伍光和. 自然地理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008: 327—370.
- [19] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 167—208.
- [20] 王选耀, 崔步礼. 山东半岛丘陵区 NDVI 的空间分布及降水量的关系研究[J]. *测绘科学*, 2008, 33(5): 40—42.
Wang Xuanyao, Cui Buli. Spatial distribution of NDVI and its relations with precipitation in Shandong Peninsula[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2008, 33(5): 40—42. (in Chinese with English abstract)
- [21] 王丽霞, 任志远. 基于 GIS 的区域植被-土壤生态系统需水定量测评[J]. *地理学报*, 2006, 61(7): 763—770.
Wang Lixia, Ren Zhiyuan. Quantificational analysis on eco-water requirement of plant-soil compound ecosystem based on GIS[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(7): 763—770. (in Chinese with English abstract)
- [22] 许振柱, 周广胜, 王玉辉. 植物的水分阈值与全球变化[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(3): 155—158.
Xu Zhenzhu, Zhou Guangsheng, Wang Yuhui. Water threshold of plant and global change[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(3): 155—158. (in Chinese with English abstract)
- [23] 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: 202—242.

Evaluation to ecological water requirement of dry land system based on ecological function zones in Yanhe watershed

Wang Lixia¹, Ren Zhaoxia¹, Ren Zhiyuan², Ma Chaoqun¹

(1. College of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. College of Tourism and Environmental Sciences, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

Abstract: In this research, by taking dry land system of Yanhe watershed as an example, we selected the index with ecology and hydrology meaning and applied the RS, GIS and GPS technologies to establish the ecological function zones. At the same time, we assessed and analyzed the ecological water requirement and its distribution characteristics at the scales of vegetation-soil landscapes and ecological function zones. The results showed that Yanhe watershed could be divided into five ecological zones, which were sand fixation zone, drought defense zone, land and water maintenance zone, farmland planting zone and vegetation protection zone, respectively. The ecological water requirement of forest-cohesive loam was the most amount with 502.31 mm/a; while that of grassland-sandy loam was the least amount with 300.01 mm/a. The ecological water requirement of vegetation protection zone was the most amount with 357.72 mm/a; while that of drought defense zone was the least amount with 304.73 mm/a. This research offers scientific references for optimal allocation and sustainable utilization of land-water resources, and it is significant for ecosystem management.

Key words: functional analysis, ecology, water, vegetation, ecological function zones, dry land system, ecological water requirement, Yanhe watershed