

方源, 谢培, 孙宁, 等. 基于“自然-社会”二元驱动的水生态功能分区: 以密云水库流域为例 [J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(6): 2113-2123.

FANG Y, XIE P, SUN N, et al. Water ecological function zoning based on the dual drive of "nature-society": taking Miyun Reservoir Basin as an example [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(6): 2113-2123.

基于“自然-社会”二元驱动的水生态功能分区

——以密云水库流域为例

方源^{1,2}, 谢培¹, 孙宁¹, 黄法铭¹, 乔飞^{1*}

1. 中国环境科学研究院

2. 湖北大学资源环境学院

摘要 水生态功能分区是根据流域水生态系统区域差异开展的分区研究, 是实现流域“分类、分区、分级、分期”的水质精细化管理的必然要求。通过梳理国内外水生态分区研究的进展及现状, 对比了不同区域分区指标的选取依据及体系特点, 分析了我国当前水生态功能分区存在的分区体系不完善、分区水生态要素考虑较少等问题, 采用“水陆结合、以水定陆”的思路, 提出了基于“自然-社会”二元驱动的水生态功能分区方法。以密云水库流域为研究对象, 通过分析水库流域自然要素及水生态特征, 探究水生态系统的驱动-响应机制, 结合管理需求, 提出密云水库流域水生态功能分区指标体系, 并开展水库流域一级、二级和三级水生态功能分区研究。结果表明, 密云水库流域水生态功能区可划分为一级区 3 个、二级区 14 个、三级区 22 个。依据各分区的水生态状况及功能, 结合当下的生态环境问题开展溯源, 并提出相应治理方案。

关键词 水生态功能分区; 分区指标; 分区方法; 密云水库流域

中图分类号: X524

文章编号: 1674-991X(2022)06-2113-11

doi: 10.12153/j.issn.1674-991X.20210491

Water ecological function zoning based on the dual drive of "nature-society": taking Miyun Reservoir Basin as an example

FANG Yuan^{1,2}, XIE Pei¹, SUN Ning¹, HUANG Faming¹, QIAO Fei^{1*}

1. Chinese Research Academy of Environmental Sciences

2. School of Resources and Environment, Hubei University

Abstract Water ecological function zoning is a zoning method based on the regional differences of the water ecosystem in a basin, which is an inevitable requirement for the fine-grained water quality management of "classification, zoning, grading and staging" in the basin. By analyzing the progress and the present situation of water ecological zoning at home and abroad, the regional partitioning index selection basis and system characteristics were compared, the problems existing in the current water ecological function zoning in China, such as imperfect partitioning system and less consideration of zoning water ecological elements in zoning were analyzed. Adopting the idea of "combining land and water, determining land by water", the water ecological function zoning method based on the dual drive of "nature-society" was put forward. By analyzing the natural elements and water ecological characteristics of the basin, exploring the driving-response mechanism of the water ecosystem, combining the management needs, proposing a water ecological function zoning index system for the Miyun Reservoir basin, and conducting a study on the primary, secondary and tertiary water ecological function zoning of the reservoir basin. The results showed that the water ecological function zones in Miyun Reservoir Basin can be divided into 3 primary zones, 14 secondary zones and 22 tertiary zones. On this basis, according to the water ecological situation and function of each region, the traceability and propose appropriate management solutions in the context of current ecological problems were carried out.

Key words water ecological function zoning; zoning index; zoning method; Miyun Reservoir Basin

收稿日期: 2021-09-07

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07111-001)

作者简介: 方源(1997—), 女, 硕士研究生, 主要从事流域水生态管理, fangyuana197@163.com

* 责任作者: 乔飞(1977—), 男, 正高级工程师, 主要从事环境规划与管理, qiaofei@caes.org.cn

水生态功能分区是反映水生态系统空间特征差异与环境关系的区域单元^[1],其依据流域生态系统格局与功能的空间差异性特征,结合水-陆耦合的原则,在流域不同尺度上进行划定^[2-3]。水生态功能分区目标是明确区域主导的水生态服务功能,为水生态系统健康评价、流域规划等环境管理手段的制定提供科学依据,完成分类、分区、分级和分期的多角度、精细化管理。当前,国内外已逐渐将水生态功能分区作为分区常用基本单元使用,并被相关政府部门应用到日常的水资源管理中^[4-5]。

密云水库地处北京市东北燕山之中,横跨潮河、白河,是北京市唯一的地表饮用水水源地,华北地区最大的人工湖泊,其生态功能主要为供水、水源涵养、水土保持、生物多样性维持、环境净化等。作为北京市最大的饮用水源供应地,密云水库担负着北京生产生活用水的重要任务。2014年以来,北京市政府出台了关于进一步加强密云水库水源保护工作的政策和意见,水生态状况持续保持健康水平,水质稳定在地表水Ⅱ类标准。为更好地治理水环境、优化水生态空间^[6-7],笔者以密云水库流域涉及北京市内的流域为研究对象,旨在在流域内实行综合管理,并对陆地和水体进行统一规划,结合功能区划分的尺度效应、自然要素分布差异规律、生态系统服务功能等理论,探讨流域的分区指标、分区原则、分区

方法,并提出针对密云水库流域的水生态功能区划方案,以期为密云水库的综合流域管理提供技术保障,同时也为其他流域的水生态功能划分提供参考。

1 水生态功能分区方法研究

1.1 国外水生态分区研究现状

加拿大森林学家 Loucks^[8]于1962年提出“生态区”(ecoregion)概念后,1967年Crowley等^[9-10]对生态学概念做了进一步界定,即具有相似生态系统或发挥相似生态功能的陆地及水域,其标志着地理分区逐渐走向了生态学领域。“水生态区”概念源自美国,是指具有相对同质的淡水生态系统和组成的地域单元^[11],其逐渐成为分区中研究最多、应用性最强的领域^[12-14]。20世纪70年代,美国国家环境保护局(US EPA)提出水环境管理不仅要关注水体污染控制问题,还应重视水生态系统结构和功能保护^[15]。1987年,Omernik^[11]基于土壤、自然植被、地形和土地利用4个区域性特征指标,探讨了水生态区划方法问题,并提出了美国三级水生态区划方案。这是全球最早的水生态区划方案,随后,其他国家和地区也相继制定相应的水生态区划方案,主要包括加拿大^[16]、欧盟^[17-18]、法国^[19]、英国^[20]、德国^[21]等。国外开展水生态分区研究的详细情况见表1。

表 1 国外水生态分区开展情况

Table 1 Development of water ecological zoning abroad

国家/地区	分区目的	分区体系	分区结果
美国 ^[11]	便于水质目标管理及水资源保护	地貌、土地利用、指标、土壤类型	15个Ⅰ级区、52个Ⅱ级区、84个Ⅲ级区
加拿大 ^[16]		基于地貌、地质、地形、植被、土壤、动物群的差异	15个生态带、53个生态省、194个生态地区、1 021个生态区
欧盟 ^[17]	河流生态特征评估	海拔、地质、流域面积、水文及气候	25个河流湖泊生态区
法国 ^[19]		地质、地形及气候特征	22个Ⅰ级区、54个Ⅱ级水文生态区
德国 ^[21]	便于生态毒理学的评估	自然植被、高程、土壤质地、气候等地表资料,采用分类回归树方法计算	21个生态区
澳大利亚 ^[22]	保护水生生物多样性	地形、气候、水文	17个生态区

1.2 国内流域水生态功能分区研究进展

我国流域水生态功能分区研究工作起步较晚,2005年,依据河流生态学中的格局与尺度理论^[23],学者系统总结了国际水生态区划的指标、方法及体系,为今后进一步研究综合流域管理奠定了基础,并对辽河流域进行了水生态分区研究^[24]。此后,我国科研人员先后开展了海河流域^[25]、太湖流域^[26]、滇池流域^[27]、巢湖流域^[28]等流域尺度的水生态功能分区研究,同时,在大同市^[29]、济南市^[30]等城市也进行了区域尺度上的水生态区划的探索。我国水生态分区的

开展情况见表2。水生态功能的驱动机制、分区体系、分区技术及分区方法等基本问题的研究推动着我国分区工作的不断深入^[31],为我国流域水生态功能分区研究奠定了基础,为流域管理提供了技术框架与指导。

1.3 国内在水生态功能分区研究方面的不足

尽管在水生态功能分区方面已在重点河湖流域做了很多探索,但我国水生态功能分区体系仍不完善。我国现有的水生态功能区的划分存在以下问题:1)分区体系不完善。我国尚未制定水生态功能

表 2 我国水生态分区开展情况
Table 2 Development of water ecological zoning in China

分区类型	分区指标	分区结果
我国水生态区划	一级: 地貌类型; 二级: 气候、行政区划; 三级: 主导的水生态功能	6个一级区、34个二级区和130个三级区
辽河流域 ^[24]	一级: 流域高程、径流深、水文地质等; 二级: 平均降雨量、土壤类型、植被类型	4个一级区、15个二级区
海河流域 ^[25]	一级: 地貌类型、径流深、年降水量、年蒸发量; 二级: 植被类型、土壤类型	6个一级区、16个二级区
太湖流域 ^[26]	一级: 流域高程、气候、土壤; 二级: 土地利用类型; 三级: 水生态指标	2个一级区、5个二级区、21个三级区
滇池流域 ^[27]	一级: 平均高程、湖库率、植被指数; 二级: 土地利用、人口密度; 三级: 营养盐、蜿蜒度、渠道化特征、藻毒素	5个一级区、10个二级区、24个三级区 (20个陆域区和4个湖体区)
巢湖流域 ^[28]	一级: 高程、河网密度; 二级: 土地利用、坡度、土壤类型; 三级: 水面率、水体类别、河流节点度; 四级: 流速、蜿蜒度、浮游植物等	3个一级区、7个二级区、28个三级区、62个四级区

分区的技术规范, 还未形成一套公认的指标体系和方法, 未来研究的关键在于普适性指标体系的构建。2) 主导环境因子筛选主观性较强^[32]。当前在主导环境因子的筛选中尚未形成一致的方法, 不同区域生态过程的主导因子差异明显, 分区结果的有效验证仍需深入探讨。3) 现有的水生态功能区划往往对自然要素考虑得较多, 对人类活动和行政区划的社会经济活动考虑得相对较少, 自然区的划分未能做到与区域社会经济相结合。4) 当前水生态功能分区主要在重点流域开展, 对于分布范围更广、治理需求更高的中小流域来说研究开展得较少。

1.4 水生态功能分区思路

水生态功能分区需考虑驱动机制的确定、分区指标体系和分区技术 3 个方面: 1) 驱动机制是分区的理论依据, 从陆域和水域结构 2 个方面展开, 其中陆域驱动要素是水域生态功能的形成基础。因此, 首先根据陆域对水生态功能的驱动机制划分一级区和二级区, 然后根据水域内的生态功能特征划分三级区。2) 分区指标体系是划分基础, 需将自然因素(水文、地形、气候、土壤)与社会要素(人类活动、经济发展)相结合。3) 分区技术是划分过程的保障, 应采用自上而下与自下而上相结合的划分方法, 自上而下是从宏观格局上对空间格局进行总体把握, 而自下而上则根据样点、集水区等小尺度上的环境因素、水生态因子表征, 采用聚类分析进行合并, 最终全面反映水生态系统结构及功能的空间异质性。

2 密云水库流域特点及分区方法

2.1 研究区概况

研究区为密云水库流域涉及北京市内的流域, 即北京市境内的密云水库白河和潮河段(115°25'E~117°33'E, 40°19'N~41°31'N)。研究区流域面积为 14 871.7 km², 涉及北京市的延庆区、怀柔区和密云

区。密云水库流域行政区划见图 1。研究区以山地、丘陵为主, 丘陵主要位于水库东部的潮河流域, 坡度相对较小, 地形起伏不大; 中低山主要位于水库西北部的白河, 坡度较大。中山区土壤以棕壤为主, 低山区为淋溶褐土。该区土地利用类型以林地、耕地为主, 其中, 林地主要分布在西部山区, 是研究区内面积占比最大的土地利用类型; 耕地主要位于水库北部的平坦开阔地区。流域年平均降水量为 590 mm, 降水季节变化明显, 6—8 月降水量占全年降水量的 76.5%^[7]。



图 1 密云水库流域行政区划

Fig.1 Administrative division map of Miyun Reservoir Basin

为全面反映水生态与自然、人类活动影响的关系, 需从陆地和水体 2 个方面构建水生态功能区, 并将水生态功能类型落实到乡镇, 结合密云区、延庆区、怀柔区的水文管理部门, 实现密云水库流域的多维精细化综合管理。

2.2 数据来源

高程数据为从地理空间数据云(Geospatial Data Cloud)下载得到的 90 m 分辨率的空间数据, 坡度数据基于数字高程数据生成; 土地利用数据来自基础地理信息中心的全球 30 m 遥感数据; 气候数据为 2000—2010 年北京市 18 个气象站的年均数据。为提高数据使用的准确性, 参考该研究区相关文献

发现,密云水库流域多年气候并无明显变化趋势^[7,25]。

2.3 分区原则及方法

密云水库流域水生态分区过程中,主要采用了发生学原理、相对一致性原则、区域共轭性原则、水陆一致性原则、汇水流域边界完整性原则等^[25];除此之外,考虑到密云水库流域水生态管理的实际需求,本研究还采取水质与生态保护并重、流域与行政区相结合、管理手段多元化的原则。采用“自上而下”差异化分区与“自下而上”聚类合并相结合的方法:一、二级分区采用“自上而下”的方法,既保证区划结果的相对一致性,又确保区域共轭性原则;三级分区采用“自下而上”的区划方法进行补充,从最小区划单元的细微差距出发,将细小斑块进行合并同类、聚类分析,保证最低级区域单元的完整性。具体技术路线见图 2。

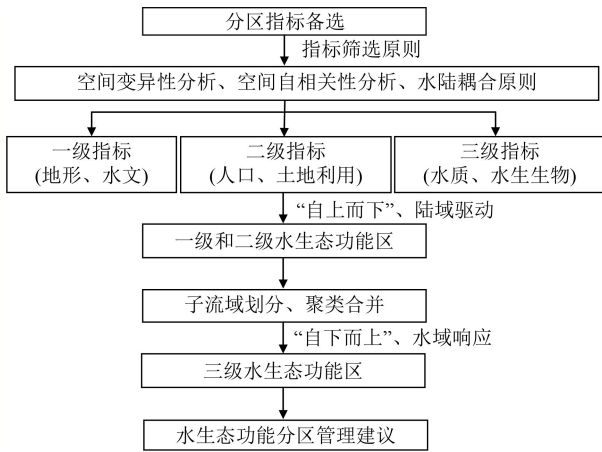


图 2 密云水库流域水生态功能分区技术路线

Fig.2 Technical route of water ecological function zoning in Miyun Reservoir Basin

2.4 数据处理

2.4.1 子流域划分

子流域划分是保证水生态系统空间完整性的基础。以密云水库流域数字高程为底图,经修正填洼,河网提取[图 3(a)],出口位置选择的处理,初步得到研究区子流域分布图。再结合实地情况,对初步划分的分布图进行校核确认,得到符合实际的密云水库流域子流域图[图 3(b)]。

2.4.2 水生态现状分析

根据“源-汇”理论,密云水库不仅接纳潮河、白河河流入库,而且作为北京市最大的饮用水水源地,出库水量较为庞大,水库水生态情况成为研究区水生态功能的主导因素,故对水库内水生态特征指标进行监测,便于对各分区开展生态功能识别。现场调查主要是对河流断面及其附近区域开展,包括水生生物特征、河岸生境、河道生境、水文状况、水环

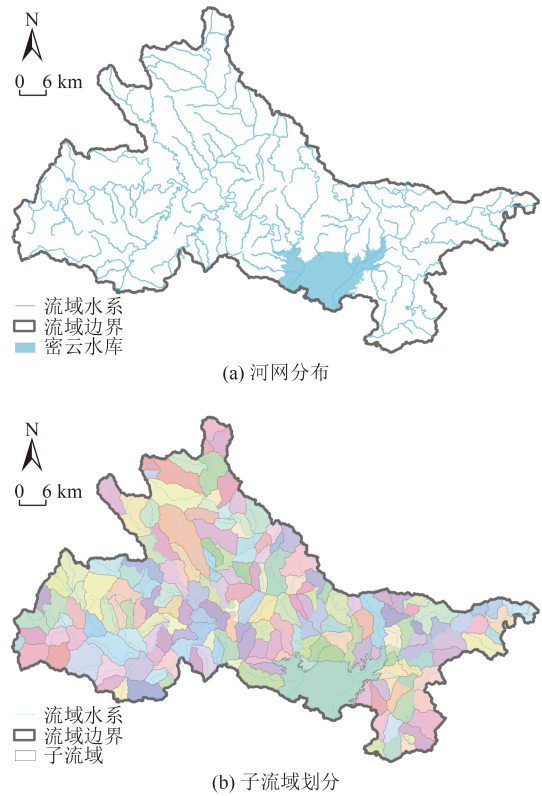


图 3 密云水库流域水系及子流域划分

Fig.3 Water system and subwatershed division in Miyun Reservoir Basin

境质量、水利设施等的调查。

研究区共有 11 个水生态监测点(图 4),其中水库有 9 个监测点(密云水库 8 个、白河堡水库 1 个),河流有 2 个监测点(白河大关桥 1 个、潮河辛庄桥 1 个)。《水生态健康评价技术规范》将地表水域水生态健康状况分为健康、亚健康、不健康 3 个等级,对应水生态健康综合指数分别为 80~100、60~80、<60,水生态健康综合指数由各指标(生境、理化、生物)单项赋分后加权求和得到。根据北京市水文总站公布的《北京市典型水域水生态监测报告(2018 年度)》,白河、潮河 2 个水生态监测站点水生态健康状



图 4 水生态监测站点

Fig.4 Water ecological monitoring stations

况总体较好, 2018 年水生态健康综合指数白河大关桥为 93.31, 潮河辛庄桥为 94.92。密云水库 2019 年健康综合指数为 87.76, 较 2018 年略有提高, 整体为健康水平(图 5)。

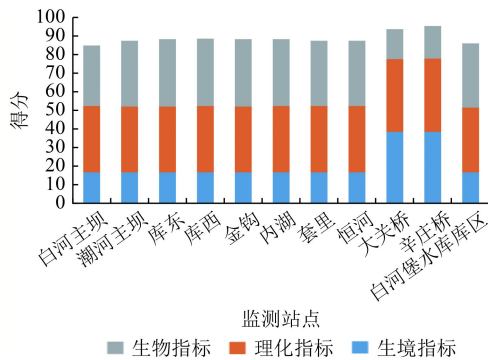


图 5 水生态监测站点各指标得分

Fig.5 Each index score of water ecological monitoring stations

2.5 分区指标选取

依据分区目的及原则, 采用空间变异性分析及空间自相关性分析方法进行分区指标筛选。

2.5.1 空间变异性分析

分析各环境指标数据的标准差、极值大小和变

异系数等, 识别各指标的空间变异程度。环境要素指标的统计值如表 3 所示。由表 3 可知, 地形(高程、坡度)、土地利用类型(耕地面积占比、城市不透水地表面积占比、林地面积占比)及人口数量的变异系数较大, 气候(年均气温、年均降水量、年均蒸发量)的变异系数较小。

2.5.2 空间自相关性分析

采用 SPSS 软件, 分析年降水量、年均气温、年蒸发量、高程、坡度、耕地面积占比、城市不透水地表面积占比、林地面积占比、人口密度 9 个环境要素指标的相关性, 结果如表 4 所示。选择不具有相关性的要素作为分区指标, 使要素信息的重复性较小。由表 4 可知, 高程与坡度相关性较大; 人口密度与高程为显著负相关。

依据上述空间变异性分析及空间自相关性分析结果, 综合考虑各指标的空间变异性大小及变异的空问尺度, 高程在大尺度上能够表现出较大的空间变异性, 土地利用类型和人口密度在中等尺度上有较大的变异性。结合密云水库流域特点, 提出水生态功能分区的总体设计, 即一、二、三级分区分别反映自然要素、人类活动的影响及水生态系统状态。

表 3 环境要素指标的统计值

Table 3 Statistical values of environmental factor indexes

项目	年降水量/mm	年均气温/℃	年蒸发量/mm	高程/m	坡度/(°)	耕地面积占比/%	城市不透水地表面积占比/%	林地面积占比/%	人口数/人
平均值	586.31	10.88	1 682.17	632.56	4.24	0.06	0.02	0.76	10 242.54
最大值	618.00	12.00	1 721.00	1 214.51	8.25	0.51	0.16	0.99	32 937.00
最小值	483.00	10.00	1 630.00	175.25	0.00	0.00	0.00	0.14	3 496.00
极差	135.00	2.00	91.00	1 039.26	8.25	0.51	0.16	0.85	29 441.00
标准差	22.88	0.39	16.64	223.70	1.55	0.09	0.03	0.20	6 949.09
变异系数	0.04	0.04	0.01	0.35	0.37	1.37	1.31	0.26	0.68

表 4 环境要素指标空间自相关性分析

Table 4 Spatial autocorrelation analysis of environmental factor indexes

环境要素指标	年降水量	年均气温	年蒸发量	高程	坡度	耕地面积占比	城市不透水地表面积占比	林地面积占比	人口密度
年降水量	1								
年均气温	-0.18	1							
年蒸发量	-0.48	-0.15	1						
高程	-0.51**	0.45	0.36	1					
坡度	-0.15	0.35	-0.05	0.68**	1				
耕地面积占比	-0.10	-0.32	0.00	-0.44	-0.41	1			
城市不透水地表面积占比	0.20	-0.40	-0.09	-0.60**	-0.45	0.60**	1		
林地面积占比	0.01	0.45	0.05	0.61**	0.53**	-0.87**	-0.70**	1	
人口密度	0.24	-0.48	-0.09	-0.50**	-0.43	0.40	0.40	-0.46	1

注: **为极显著相关。

依照水-陆生态水文耦合原则,选择高程、水文、气候作为一级分区的备选指标,由于气候指标在整个研究区内相差不大,并不适合本研究区。

因此,一级分区结合高程要素,从自然驱动角度出发,将流域作为分区指标,对水库的两大流域集水区进行区别划分。二级分区指标从人类胁迫的驱动角度出发,考虑研究区土地利用类型占比最多的部

分,即林地面积、耕地面积、城市不透水地表面积与水生态系统关系密切,故二级分区指标选用土地利用及人口密度。三级分区从更小尺度出发,根据生态系统的原理,从水生态系统结构的功能表征进行合并,指标依据为水体生态特征,如水质类别、水生生物状况、生境结构等。密云水库流域水生态分区指标选取见表 5。

表 5 密云水库流域三级水生态分区选取

Table 5 Selection of 3 grades of water ecological zoning of Miyun Reservoir Basin

分区级别	差异驱动类型	主要因素	分区指标	指标选取依据
一级分区	自然因素	水文条件	流域	保持流域生态水文特征完整性
		地形	高程	陆地生态系统对水生态系统作用
二级分区	人类活动	土地利用类型	林地面积占比等	陆地生态系统对水生态系统作用
		人口密度	密度	体现社会经济对水质的影响
三级分区	水生态系统状态(水质、水生生物)	水生生物	底栖动物多样性	反映河流水生生物多样性
		水质	化学参数	反映水环境维持状态
		环境	生境指标得分	反映生境栖息地特征
		敏感区域	自然保护区所在位置	体现人对水生态系统的保护

3 密云水库流域水生态功能分区方案

3.1 一级分区

水生态功能一级分区体现流域内不同区域的自然地理差异,识别出流域内水资源供需的区域差异。根据密云水库流域的水系及水库特征,将其分为 3 个一级水生态功能区,即潮河流域区、白河流域区及密云水库水体区。与河流流域相比,水库流域入库、出库河流并存,考虑到水库的开放性和复杂性,基于水库固有的生态特性及水库的完整性,在一级分区中,将密云水库单独作为一个水域分区。命名以“位置+流域+水生态系统类型”,如图 6(a)所示。I、II、III 3 个一级分区分别命名为西北部白河流域山地区、东南部潮河流域丘陵-平原区、中南部密云水库水体区,一级分区指标特征见表 6。

3.2 二级分区

水生态功能二级功能区从人类活动影响的角度出发,依据土地利用类型和社会经济条件,结合各乡镇人口密度,选取农田、林地、城市用地面积百分比作为二级分区的指标。在一级分区的基础上,本研究区共划分为 14 个水生态功能二级区,如图 6(b)所示。二级区命名主要体现生态系统的典型特征,故根据“区位+生态系统类型(人口密度、土地利用)”命名,区位包括白河流域、黑河流域、汤河流域、潮河流域、清水河流域、安达木河流域 6 个二级支流及密云水库水体,生态系统类型包括森林、农业、城

市,二级分区指标特征见表 7。

3.3 三级分区

为保证子流域边界完整性,利用 ArcGIS 软件进行水文分析,将密云水库流域划分成 189 个子流域。采用层次聚类法对各样点对应的三级指标进行聚类,由聚类结果根据指标划分不同功能区(表 8)。同时,考虑北京市划定的自然保护区区位,得到生物保护敏感区域,并在一级、二级分区边界的基础上,形成三级功能区的边界。三级区命名根据“水生态功能类型-区位”(水生态功能类型包括生境维持、水源涵养、农业生产维持及城镇支撑),分区结果如图 6(c)所示。为了更紧密地与本区的水环境管理工作进行结合,便于区县水文部门的权责分明,结合怀柔区、延庆区、密云区的行政边界对水生态分区进行三级划分,三级分区命名见表 9。

3.4 分区结果讨论

本研究将密云水库流域水生态功能分区进行了 3 个等级的划分,分别为 3 个一级区,14 个二级区及 22 个三级区。一级分区根据研究区内高程及水系、水库特征,划分为白河流域山地区、潮河流域丘陵-平原区和密云水库水体区,体现了流域内水资源供需的区域差异。二级分区主要根据研究区的土地利用类型特征,划分为 5 个农业区、2 个城镇区、6 个森林区及 1 个水体区,从人类活动影响程度方面体现各区域差异。三级分区从水生态功能类型方面进

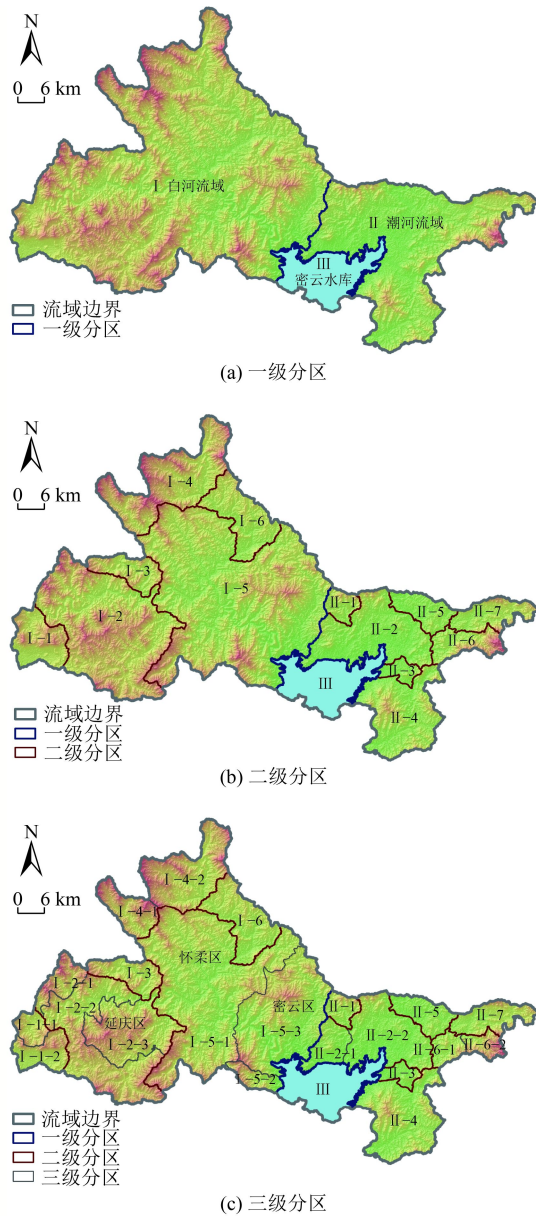


图 6 密云水库流域水生态功能分区

Fig.6 Water ecological function zoning of Miyun Reservoir Basin

行区分, 其中, 生境维持区有 12 个, 主要分布在白河流域西北部、西南部及潮河流域的东南部, 面积为 2 571.33 km², 占 69.09 %; 农业生产维持区 6 个, 主要分布在白河流域中部及潮河流域中部的地形平坦海拔较低的地区, 面积为 775.27 km², 占 20.83%; 城

镇支撑区 2 个, 主要分布在潮河流域的北部及密云水库东部, 面积为 125.45 km², 占 3.37%; 水源涵养区 2 个, 为密云水库及白河堡水库所在地, 面积为 249.55 km², 占 6.71%。

从行政区划来看, 延庆区共有 6 个分区, 水生态功能类型主要为生境维持, 占区域总面积的 72.62%, 因此, 该区应重点关注林、草地资源及加强对自然保护区的管控; 怀柔区共有 4 个分区, 主要水生态功能为生境维持, 占比为 86.59%, 应重点关注林、草地资源; 密云区共有 12 个分区, 主要水生态功能为生境维持, 占比为 53.29%, 其次, 农业生产和城镇支撑功能区占比为 33.9%, 该区的重要水生态功能区为密云水库的水源涵养区, 占密云区总面积的 12.81%。总体来看, 密云区水生态功能较为丰富, 应在维持生境的基础上, 重点关注农业及生活污水的污染。当前, 研究区内水生态监测点位主要位于密云水库库区、白河堡水库库区以及白河的大关桥和潮河的辛庄桥, 分别涉及三级分区中的密云水库水源涵养区-密云区、白河流域白河堡水库水源涵养-延庆区、白河流域农业生产维持-密云区、潮河流域城镇支撑-密云区, 主要监测指标为水生生物、生境及水质理化情况 3 类。从监测数据来看, 密云水库库区汇水水质为 II 类, 生境、水质理化指标得分较低, 水生生物情况良好; 白河堡水库区汇水水质为 II 类, 生境、水质理化指标得分较低, 水生生物情况良好; 大关桥农业生产维持功能以及辛庄桥城镇支撑功能, 生境、水质理化指标得分较高, 但为生物受损型, 其鱼种和底栖动物为不健康状态。整体来看, 生境维持、农业生产维持、城镇支撑区的水体生境、水质理化情况较好, 但水生生物情况较差; 水源涵养区水生生物多位于此, 但生境情况均受损。因此, 对水源涵养功能区生境的修护和维持成为本研究区水生态关注的重点。

4 密云水库流域水生态三级分区管理建议

4.1 水生态功能保护目标

三级分区划分为不同的生态功能类型 (图 7), 生态功能类型包括生境维持区、城镇支撑区、农业生产维持区、水源涵养区 4 类。

表 6 密云水库流域一级分区指标特征

Table 6 Index characteristics of the first level zoning in Miyun Reservoir Basin

一级编号	分区名称	面积/ km ²	平均高程/ m	平均坡度/ (°)	年降水量/ mm	年均气温/ ℃	年蒸发量/ mm	干旱 指数	人口密度/ (人/km ²)	地形
I	西北部白河流域山区	2 582.32	710.28	4.59	581	11.03	1 684	1.94	471.14	山地
II	东南部潮河流域丘陵-平原区	936.33	457.3	3.45	598	10.52	1 678	1.87	1 343.13	丘陵-平原
III	中南部密云水库水体区	202.95	187.91	2.49	608	11	1 630	1.79	87	水域

表 7 密云水库流域二级分区指标特征

Table 7 Index characteristics of the second-level zoning in Miyun Reservoir Basin

一级编号	二级编号	二级分区名称	面积/km ²	农田面积 占比/%	城市面积 占比/%	林地面积 占比/%	人为用地 面积占比/%	植被 覆盖度	人口密度/ (人/km ²)
I	I-1	西部白河上游中高山农业区	152.05	12.74	1.19	61.59	13.93	一般	343.02
	I-2	西部白河中游中高山森林区	642.6	2.75	0.45	87.29	3.19	很高	423.96
	I-3	西部黑河流域低山农业区	90.19	5.30	0.57	65.82	5.87	稍低	336.75
	I-4	北部汤河流域中高山森林区	333.2	2.58	0.59	87.76	3.17	很高	306.32
	I-5	中部白河下游低山森林区	1 196.3	3.12	1.38	85.02	4.51	很高	518.60
	I-6	北部白河下游低山农业区	167.98	7.14	2.14	73.87	9.29	较高	573.76
II	II-1	北部潮河流域中高山森林区	60.64	0.93	0.47	90.89	1.40	很高	1 217.88
	II-2	东北部潮河流域平原-丘陵农业区	294.66	20.07	4.49	46.76	24.55	较低	1 771.13
	II-3	东部清水河流域平原-丘陵城市区	41.6	16.61	10.70	46.95	27.31	低	1 575.95
	II-4	东南部清水河流域低山森林区	264.8	4.49	2.75	73.84	7.24	较高	1 146.53
	II-5	东北部潮河流域低山城市区	83.85	10.71	8.17	51.72	18.88	低	1 294.08
	II-6	东部安达木河流域中高山森林区	89.61	2.59	0.51	85.32	3.11	很高	623.96
	II-7	东部安达木河流域低山农业区	101.17	10.96	2.02	56.79	12.97	一般	1 002.55
III	III	中南部密云水库水体水源区	202.95	13.44	1.20	21.35	14.64	低	87.00

表 8 功能类型评价依据

Table 8 Function type evaluation basis

功能类型	评价指标	理论依据	数据来源
生境维持	林地面积占比	反映流域陆生环境质量	林地和草地面积占总面积的比例
	年均降水量	反映水资源的主要来源	多年降水量除以年数得到的均值
	河网密度	反映水生环境规模状况	干支流总河长占流域面积的比例
水源涵养	林地面积占比	反映水源涵养能力	林地面积占总面积的比例
农业生产维持	农田面积占比	表征来自农业、养殖业等的营养物质	农田面积占总面积的比例
城镇支撑	人口密度	反映人类对水环境的影响	单位土地面积上的人口数量
	城市面积占比	反映对社会经济发展的支撑能力	城市面积占总面积的比例

表 9 三级分区命名

Table 9 Three level partitions naming

一级编号	二级编号	三级编号	三级分区名称
I	I-1	I-1-1	白河流域白河堡水库水源涵养-延庆区
		I-1-2	白河流域农业生产维持-延庆区
	I-2	I-2-1	白河流域生境维持-水头自然保护区-延庆区
		I-2-2	白河流域生境维持-延庆区
		I-2-3	白河流域生境维持-大滩自然保护区-延庆区
	I-3	I-3	白河流域农业生产维持-延庆区
	I-4	I-4-1	白河流域生境维持-怀柔区
		I-4-2	白河流域生境维持-喇叭沟门自然保护区-怀柔区
	I-5	I-5-1	白河流域农业生产维持-怀柔区
		I-5-2	白河流域农业生产维持-云蒙自然保护区-密云区
		I-5-3	白河流域农业生产维持-密云区
	I-6	I-6	白河流域生境维持-怀柔区

(续表9)

一级编号	二级编号	三级编号	三级分区名称
II	II-1	II-1	潮河流域生境维持-密云区
	II-2	II-2-1	潮河流域农业生产维持-云峰自然保护区-密云区
		II-2-2	潮河流域城镇支撑-密云区
	II-3	II-3	潮河流域城镇支撑-密云区
	II-4	II-4	潮河流域生境维持-密云区
	II-5	II-5	潮河流域城镇支撑-密云区
	II-6	II-6-1	潮河流域生境维持-密云区
II-6-2		潮河流域生境维持-雾灵自然保护区-密云区	
II-7	II-7	潮河流域农业生产维持-密云区	
III	III	III	密云水库水源涵养区-密云区

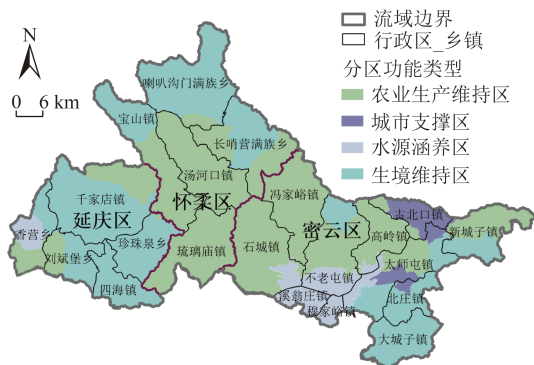


图 7 各区及乡镇水生态功能类型

Fig.7 Water ecological function types in various districts and towns

生境维持区主要考虑林地面积占比、年均降水量及河网密度指标, 该区植被覆盖度高, 人口密度较小, 几乎不存在人为对环境的破坏及影响, 生境情况较好, 水生态处于健康状态。北京市多个自然保护区分布于此, 包括水头、大滩、喇叭沟门、云蒙山、云峰、雾灵山自然保护区。农业生产维持区依据农田面积占比情况进行划分, 该区相较其周围区域耕地面积占比更大, 人口密度也相对较高, 河流多用于灌溉, 受农田、养殖业污染压力较大。城镇支撑区主要根据人口密度及城市面积占比情况进行划分, 水功能定义为城市用水, 此功能区较多受到生活用水的污染。水源涵养区考虑了林地占比及水域分布特征, 该区主要功能是防洪灌溉及城市用水, 根据水生态监测数据显示, 该区富营养化状况有逐年加重趋势。

4.2 密云水库流域分区管理建议

从三级分区的各乡镇水生态功能类型(图 7)及特定保护区域出发, 倒逼环境管理的方法, 形成密云水库流域水生态分区管控的基础框架, 为差异化管理目标及各区域社会经济发展规划、环境管理制度的制定提供基础依据。

4.2.1 生态功能维持

密云水库流域生境维持区主要涉及延庆区的千家店镇、四海镇、珍珠泉乡和刘斌堡乡, 怀柔区的喇叭沟乡、宝山镇及长哨营满族乡的山区部分, 密云区的大城子镇及北庄镇。该功能区管控目标为保护丰富的林地资源, 注重对生境的恢复, 为重点管控区。管理建议为围栏封育, 保护好现有生态状况, 防止新的人为破坏或水土流失; 做到生物措施与工程措施相结合, 增加调蓄能力; 加强人为管控, 禁止砍伐、合理放牧, 及时退耕还林。

农业生产维持区主要涉及延庆区千家店镇北部区域, 怀柔区的汤河口镇、琉璃庙镇及宝山镇、长哨营满族乡的平原地区, 密云区石城镇、冯家峪镇、高岭镇、不老屯镇中部及新城子镇北部地区。该功能区管控目标为防治农业面源污染, 严格控制农药化肥使用, 关注非点源污染的影响, 为一般管控区。管理建议为积极发展生态农业, 改进耕作方式, 同时, 控制化肥用量, 鼓励使用农家肥, 减少农业面源污染和对河流水质的影响。

城镇支撑功能区主要涉及密云区的古北口镇及太师屯镇中部地区。该功能区管控目标为深化生活污水减排, 严格执行污水排放标准, 为一般管控区。因此, 要加大区域污染源治理, 推行清洁生产和循环经济, 减少污水排放, 建立节水型社会; 增强城镇污水收集、处理能力, 实现污水回收全覆盖。

水源涵养区主要位于密云水库及白河堡水库, 涉及密云区的溪翁庄镇、穆家峪镇及不老屯镇南部地区和延庆区的香营乡。该功能区水质目标为 II 类, 具体管控目标为严格保护生态环境, 依法禁止开发建设活动, 为优先管控区。因此, 要严格实行水源地保护措施, 杜绝水库周边的农业面源污染, 减少水库养殖, 减轻水质恶化和富营养化发生。对于旅

游风景区的水库,不能超过水库旅游承载力,减少人为因素对生物栖息地的破坏及游客产生的垃圾对水质的影响。同时,加强入河排污口整治,严控排污行为,强化水资源监督。

4.2.2 特定保护区域管理

自然保护区管控目标为确定主要保护生物的安全,维持和恢复珍稀濒危野生动植物种群数量及赖以生存的栖息环境。建议加强生物多样性保护,依据不同保护区类型(森林、湿地),完善相应的法律法规,协调好各自然保护区生态保护与开发建设经济发展的矛盾,形成人与自然和谐发展。

敏感水体区(水库)作为北京市最重要地表饮用水水源地,应严格遵守《饮用水水源保护区污染防治管理规定》,禁止一切破坏水环境生态平衡的活动。具体管理建议为增加森林面积,涵养水源,减少无效蒸发,完善水土流失监管;提高水资源的综合利用;加强污染源的管控,包括生活污水、养殖废水、工业废水等,加强整治,确保上游地区的污水达标排放。

5 结论

(1)水生态功能区划分技术包括分区备选指标提出、指标适宜性分析、分区指标筛选及分区方案合理性分析 4 个步骤,指标筛选具体采用空间变异性分析、空间自相关性分析,遵循水陆耦合的原则。基于“自然-社会”二元驱动,密云水库流域一级分区考虑自然要素,分区指标为水文和地形;二级分区从人类活动角度出发,指标为人口密度及土地利用;三级分区指标为水生态系统的状态及自然保护区,各分区通过自然空间结构及社会影响的差异性来反映水生态功能的空间差异性。

(2)水生态功能分区划分可采用“子流域划分—指标体系构建—相同结果合并—分区边界确定”的分区方法,基于 ArcGIS 数据合并得到各级分区结果。密云水库流域水生态功能区共划分为一级区 3 个、二级区 14 个和三级区 22 个,并明确了各功能区的自然特征及主导的水生态功能。

(3)水生态功能分区以集水区为基本划分单元,以水生态为基础,强调“陆水相连”,同时也考虑“源-汇分开”。本研究将密云水库区域单独作为一个分区,重点讨论密云水库的水生态状况及功能。密云水库流域水生态功能分区作为水环境管理的一种新的管控治理空间区域,将有助于密云水库流域水环境管理和水生态功能恢复。

参考文献

- [1] OMERNIK J M, BAILEY R G. Distinguishing between watersheds and ecoregions[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1997, 33(5): 935-949.
- [2] KARR J R, DUDLEY D R. Ecological perspective on water quality goals[J]. *Environmental Management*, 1981, 5(1): 55-68.
- [3] 唐涛,蔡庆华.水生态功能分区研究中的基本问题[J]. *生态学报*, 2010, 30(22): 6255-6263.
- [4] TANG T, CAI Q H. The essential issues in aquatic ecological function regionalization[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(22): 6255-6263.
- [5] SPALDING M D, FOX H E, ALLEN G R, et al. Marine ecoregions of the world: a bioregionalization of coastal and shelf areas[J]. *BioScience*, 2007, 57(7): 573-583.
- [6] JENERETTE G D, LEE J, WALLER D W, et al. Multivariate analysis of the ecoregion delineation for aquatic systems[J]. *Environmental Management*, 2002, 29(1): 67-75.
- [7] 潘丽波,乌日罕,王磊,等.北京市密云水库上游土壤和沉积物重金属污染程度及风险评价[J]. *环境工程技术学报*, 2019, 9(3): 261-268.
- [8] PAN L B, WU R H, WANG L, et al. Heavy metal pollution levels and risk assessment of soils and sediments in the upstream of Miyun Reservoir, Beijing[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2019, 9(3): 261-268.
- [9] 刘可暄,王冬梅,张满富等.密云水库流域水生态空间管控思路探讨[J]. *北京水务*, 2021(4): 43-46.
- [10] LIU K X, WANG D M, ZHANG M F, et al. Discussion on water ecological space control in the Miyun Reservoir watershed[J]. *Beijing Water*, 2021(4): 43-46.
- [11] LOUCKS O L. A forest classification for the Maritime Provinces[J]. *Proceedings of the Nova Scotian Institute of Science*, 1962, 25: 1958-1962.
- [12] CROWLEY J M. Biogeography[J]. *The Canadian Geographer*, 1967, 11(4): 312-326.
- [13] NEVILL J. Managing the cumulative effects of incremental development in freshwater resources[J]. *Environmental and Planning Law Journal*, 2003, 20(2): 85-94.
- [14] OMERNIK J M. Ecoregions of the conterminous United States[J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 1987, 77(1): 118-125.
- [15] BREWER I. The conceptual development and use of ecoregion classifications [D/OL]. [2021-09-10]. https://ir.library.oregonstate.edu/concern/graduate_thesis_or_dissertations/bg257j40p.
- [16] HUGHES R M, WHITTIER T R, ROHM C M, et al. A regional framework for establishing recovery criteria[J]. *Environmental Management*, 1990, 14(5): 673-683.
- [17] HUGHES R M, LARSEN D P, OMERNIK J M. Regional reference sites: a method for assessing stream potentials[J]. *Environmental Management*, 1986, 10(5): 629-635.
- [18] OMERNIK J M, GALLANT A L. Defining regions for evaluating environmental resources[M]. Corvallis, Oregon: US EPA Environmental Research Laboratory, 1989.
- [19] WIKEN E B. Terrestrial ecozones of Canada[R]. HULL: Environment Canada, Lands Directorate, 1986.

- [17] KAIKA M. The water framework directive: a new directive for a changing social, political and economic European framework[J]. *European Planning Studies*, 2003, 11(3): 299-316.
- [18] MOOG O, SCHMIDT-KLOIBER A, OFENBÖCK T, et al. Does the ecoregion approach support the typological demands of the EU "Water Framework Directive"[J]. *Hydrobiologia*, 2004, 516(1/2/3): 21-33.
- [19] WASSON J G, CHANDESRIS A, PELLA H, et al. Typology and reference conditions for surface water bodies in France: the hydro-ecoregion approach[C]. Symposium "Typology and ecological classification of lakes and rivers", Helsinki, Finland, 2002.
- [20] LOGAN P. Ecological quality assessment of rivers and integrated catchment management in England and Wales[J]. *Journal of Limnology*, 2001, 60(10): 25.
- [21] SCHROEDER W, PESCH R. Synthesizing bioaccumulation data from the German metals in mosses surveys and relating them to ecoregions[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 374(2/3): 311-327.
- [22] MARCHANT R, WELLS F, NEWALL P. Assessment of an ecoregion approach for classifying macroinvertebrate assemblages from streams in Victoria, Australia[J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 2000, 19(3): 497-500.
- [23] 李艳梅, 曾文炉, 周启星. 水生态功能分区的研究进展[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(12): 3101-3108.
- LI Y M, ZENG W L, ZHOU Q X. Research progress in water eco-functional regionalization[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(12): 3101-3108.
- [24] 张博. 辽河流域水生态功能一、二级分区研究[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2011.
- [25] 孙然好, 汲玉河, 尚林源, 等. 海河流域水生态功能一级二级分区[J]. *环境科学*, 2013, 34(2): 509-516.
- SUN R H, JI Y H, SHANG L Y, et al. Regionalization of the freshwater eco-regions in the Haihe River Basin of China[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(2): 509-516.
- [26] 高永年, 高俊峰. 太湖流域水生态功能分区[J]. *地理研究*, 2010, 29(1): 111-117.
- GAO Y N, GAO J F. Delineation of aquatic ecoregions in Taihu Lake Basin[J]. *Geographical Research*, 2010, 29(1): 111-117.
- [27] 高喆, 曹晓峰, 黄艺, 等. 滇池流域水生态功能一二级分区研究[J]. *湖泊科学*, 2015, 27(1): 175-182.
- GAO Z, CAO X F, HUANG Y, et al. Research of level I and II aquatic ecological function regionalization in Lake Dianchi Basin[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, 27(1): 175-182.
- [28] 高俊峰. 巢湖流域水生态功能分区研究[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [29] 邢剑波, 张智渊. 大同市水生态环境功能分区管理体系研究[J]. *环境与可持续发展*, 2019, 44(5): 92-95.
- XING J B, ZHANG Z Y. Study on water ecological functional zoning management system in Datong[J]. *Environment and Sustainable Development*, 2019, 44(5): 92-95.
- [30] 张欣, 徐宗学, 殷旭旺, 等. 济南市水生态功能区划研究[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 52(3): 303-310.
- ZHANG X, XU Z X, YIN X W, et al. Aquatic ecosystem function zoning in Jinan[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2016, 52(3): 303-310.
- [31] CHEN D D, JIN G, ZHANG Q, et al. Water ecological function zoning in Heihe River Basin, Northwest China[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2016, 96: 74-83.
- [32] 张楠, 张远, 孔维静, 等. 太子河流域水生态功能Ⅱ级区的划分[J]. *环境科学研究*, 2013, 26(5): 472-479.
- ZHANG N, ZHANG Y, KONG W J, et al. Technique for freshwater ecosystem functional management level III region in Taizi River Basin[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, 26(5): 472-479. ⊗