

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2015.04.016

黔中平寨水库保护区非点源污染风险评价与敏感区域识别

涂刚琴¹,刘鸿雁^{1,2},赵志鹏¹,吴攀¹,刘沛¹,吴斌³,安勇³
(1. 贵州大学资源与环境工程学院,贵州 贵阳 550025;
2. 贵州大学环境工程规划设计研究所,贵州 贵阳 550025; 3. 六盘水市环境保护局监测站,贵州 六盘水 553000)

摘要:以黔中平寨水库保护区和准保护区为研究对象,采集了干流断面水样 59 个,支流断面水样 41 个,和 88 个土壤样品,分析评价流域的非点源污染现状,并用 GIS 进行空间解析。结果表明,枯水期时,流域水质以Ⅰ类居多,占观测点个数的 59.62%,Ⅱ~Ⅲ类占 15.38%,Ⅳ类占 5.77%,Ⅴ类占 9.62%;丰水期时,水质以Ⅳ类居多,占 72.92%,Ⅰ~Ⅲ类只占 22.91%,Ⅴ类占 4.17%,主要超标指标为 TN、NH₃-N、TP,流域呈现出非点源污染的典型特征。通过评价土地利用因子(*L*)、径流因子(*Q*)、距离因子(*D*),利用改进的理想解法(TOPSIS)确定各因子所占的权重,得到流域非点源污染风险评价指数,并将流域划分为 4 类敏感控制区域。其中,中度敏感区分布较为均匀,主要是靠近水系的坡耕地区域,应对坡耕地进行种植区划调整,并加强对肥料等农用化学品的管理;而高度敏感区域主要分布在准保护区,其污染源主要是城镇生活污水和煤矿开采废水,应加快该区域城镇生活污水集中处置和煤矿废水治理工程的建设力度。

关键词:非点源污染;水质;土地利用因子;径流因子;距离因子;TOPSIS 法

中图分类号:X820.4,X522 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2015)04-0087-07

Risk assessment of non-point source pollution and sensitive region recognition to Pingzhai Reservoir protection areas in central Guizhou

TU Gangqin¹, LIU Hongyan^{1,2}, ZHAO Zhipeng¹, WU Pan¹, LIU Pei¹, WU Bin³, AN Yong³
(1. College of Resource and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;
2. Institute of Environmental Engineering Planning and Design, Guizhou University, Guiyang 550025, China;
3. Monitoring Station of Liupanshui Environmental Protection Bureau, Liupanshui 553000, China)

Abstract: Taking Pingzhai Reservoir Protection Area and Quasi-protection Area as the study object, we collected 59 water samples from the trunk stream section and 41 ones from the branch stream section, and 88 soil samples to analyze and evaluate the situation of non-point source pollution in the basin, and made a space analysis by GIS. The results show that, in the low water period, the water quality of class I accounted for 59.62% in all water samples, class II ~ III accounted for 15.38%, class IV accounted for 5.77%, class V accounted for 9.62%; In the high water period, the ratio of class IV water was as much as 72.92%, class I ~ III accounted for 22.91%, class V accounted for 4.17%, and the main index exceeding standards are TN、NH₃-N and TP, showing a typical characteristics of non-point source pollution. The weights of land utilization factor(*L*)、runoff factor(*Q*) and distance factor (*D*) were determined by the modified TOPSIS, getting the risk assessment index of non-point source pollution. The research areas were divided into 4 categories of sensitive control areas according to the risk assessment index. Among them, moderately sensitive areas was mainly distributed in the slope farmland near the river, so we should adjustment planting structure and strengthen the management of fertilizer and other agricultural

基金项目:贵州省科技厅黔科合重大专项([2012]6009-7)
作者简介:涂刚琴(1990—),女,硕士研究生,研究方向为水环境模拟。E-mail:tugangqin11@163.com
通信作者:刘鸿雁,教授。E-mail:re_hyliu@gzu.edu.cn

chemicals in these areas. Highly sensitive regions were mainly distributed in urban residential areas, the main source of pollution were the urban sewage and coal mining wastewater, so we should promote the construction of urban sewage and coal mine wastewater disposal system.

Key words: non-point source pollution; water quality; land utilization factor; runoff factor; distance factor; TOPSIS

随着点源污染控制能力的提高,非点源污染成为影响水环境质量的重要来源。非点源污染以农业面源污染为主^[1-2]。由于非点源污染具有随机性、广泛性、隐蔽性和滞后性,使得非点源污染控制难度大。对区域内土壤和水质现状进行综合评价,实现非点源污染敏感区域的识别,对保护和合理利用区域内水土资源至关重要。评价土壤和水质现状的方法很多,可以将其分为两类,一类为定量分析^[3],一类为定性分析^[4-5]。定性评价可以很好地反应土壤和水质所处的质量级别水平。其中,灰色关联度法由于其评价步骤简洁实用,并且所需参数较少,从而被广泛运用^[6-8]。赖坤容等^[6]采用灰色关联法对延安市宝塔区境内的流域水质现状进行了评价,得到各河段的水质评价等级,便于研究区内水资源的合理利用与重点防治。非点源污染识别和评价的方法,根据建立机理和模拟过程的不同,主要分为两种,即机理模型和经验模型^[9]。机理模型通过定量描述整个流域内的复杂污染过程,识别非点源污染的主要来源和迁移路径,并评估其对水质的影响,如 AnnAGNPS 模型^[10],SWAT 模型^[11],HSPF 模型^[12]。但机理模型结构复杂,所需的基础数据庞大,在数据信息缺乏的地区使用困难。经验模型通过建立污染负荷与土地利用类型或径流量间的关系,反映非点源污染的输出强度,如潜在污染指数(PNPI)法^[13]、输出系数法^[14]。这类模型所需参数少,并能保证一定的精度,可满足数据缺乏地区进行非点源污染评价的要求。

黔中水利枢纽工程是贵州省首个大型跨地区、跨流域长距离水利调水工程,总库容 10.8 亿 m³,覆盖面积达 4711 km²,干渠总长为 156.5 km,总灌溉面积 4.348 万 hm²,建成后可以解决 39.5 万人畜饮水问题。黔中水利枢纽工程平寨水库集水流域溶解态重金属质量浓度均低于Ⅲ类水标准限值,这与周围汇入水体水质密切相关^[15]。刘鸿雁等^[16]的研究表明,乌江流域水质有逐渐恶化的趋势,主要污染的区域在乌江上、中游地区的支流河段。为了降低由于非点源污染导致水体受到的影响,有必要研究该区域内土壤的养分分布特征及水质现状,并对研究区进行非点源污染敏感性分区。由于基础数据缺乏,需要一个数据输入少,但又精度高,且操作简单,能

全面评价非点源污染的模型。笔者利用潜在污染指数(PNPI)的机理,通过适当的参数指标改进后,对研究区进行了非点源污染评价,以期为制定合理的监管措施提供理论依据,促进区域内非点源污染状况的监测和农业管理措施的研究。

1 研究区域概况

平寨水库上游流域见图 1。研究区范围主要设在保护区和准保护区内,其地理坐标为:北纬 26°25′~26°40′、东经 105°10′~105°30′,涉及纳雍、织金、六枝和水城 4 个县共 7 个乡镇(新房乡、阳长镇、曙光乡、比德乡、化乐乡、百兴镇和鸡场乡),总面积约 375.52 km²。流域内地形复杂,地势高低悬殊,冷暖气流常被海拔高的山脉阻挡,局部地区形成较强对流天气,年平均气温 10.4~15.1℃。水量季节性变化明显,冬季主要受到北方西伯利亚气流影响,多为阴雨天气,雨量较少;夏季受到印度孟加拉湾西南暖湿气流和西太平洋海洋气候影响,5—10 月雨量较多,尤其集中在 6—7 月,区域水资源丰富,多年平均降雨量为 1 089.6 mm。流域为乌江上游三岔河流域,属于长江流域。

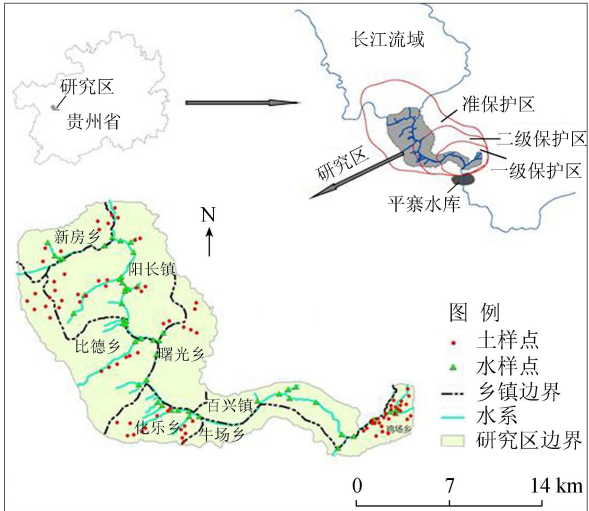


图 1 平寨水库上游流域

2 研究方法

2.1 样品采集与分析

2014 年 3 月进行土壤样品的采集,运用 GPS 定位功能,取 0~20 cm 表层土样,每个样点周围进行 5

次重复采样,按4分法混合组成待测土样约1kg,共采集土壤样品88个,见图1。土样经风干处理后过1mm筛,部分样品过0.25mm筛备用。pH值用电极法测定,其他测定方法为:土壤TP用NaOH熔融-钼锑抗比色法,TN用半微量开氏法,有机质用油浴加热重铬酸钾容量法,土壤中有效磷用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法,碱解氮用扩散吸收法^[17]。水样的采集分枯水期(4月)和丰水期(9月)进行,采样点布设涉及平寨水库整个集水流域,包括主干断面和主要的支流,在每一个主要支流汇入主干断面前50~100m、主干断面汇入点上游200~500m及支流汇入主干断面完全混合处设置监测断面,采样点分布见图1。共采集水样100个,其中枯水期水样52个,丰水期水样48个。DO质量浓度采用便携式水质参数仪(Multi340i,德国)现场测定;NH₃-N质量浓度的测定使用纳氏试剂比色法;TN质量浓度采用分光光度法测定;TP质量浓度的测定采用钼酸铵分光光度法;COD_{Mn}质量浓度参照国际标准ISO 8467—1986《水质高锰酸盐指数的测定》进行测定。

2.2 评价和分区方法

由于本研究有限的水质时空监测数据所提供的信息是不完全的,并且水环境中污染物质与周围环境存在着复杂的联系^[18],水环境是一个典型的具有灰色性的系统^[19],所以,运用灰色关联分析(GRA)法将水质状态看作灰色变量,水质级别看作灰类,以避免分级临界值附近的实测浓度值的微小变化可能导致的评价结果级别归属的改变^[20]。笔者在IP等^[21]所采用的邓聚龙灰色关联系数分析方法的基础上,提出采用正弦函数计算灰色关联系数。进行土壤养分评价时,将评价对象的实测值作为待比序列,将全国第二次土壤普查养分分级标准作为参比序列。进行水质评价时,将评价对象的实测值作为待比序列,GB 3838—2002《地表水环境质量标准》作为参比序列。根据评价结果,判断研究区是否具有非点源的污染特征。

潜在非点源污染指数(potential non-point population index, PNPI)法在2005年成功运用在意大利Tiber河流评价中,它的计算基于GIS,且能在流域尺度上反映每个土地单元对河流造成污染的可能性^[13]。笔者借鉴PNPI指标参数的选择原则,在确保评价结果客观的基础上,对指标参数进行了改进和优化,计算公式为

$$L_1 = w_1 D + w_2 Q + w_3 L \tag{1}$$

式中:L₁为非点源污染风险评价指数;D为距离影响因子;Q为径流影响因子;L为土地利用影响因子。w₁、w₂、w₃分别为D、Q、L的评价权重。

2.2.1 径流影响因子的确定

SCS模型是美国水土保持局提出的经验公式,用以估算降雨过程径流量,其结果简单、计算方便,被广泛推广使用^[22-24]。C_N是反应降雨前流域特征的一个综合参数,它与流域前期土壤湿润程度(AMC)、坡度以及植被、土壤类型和土地利用现状有关,是SCS模型的核心。C_N确定步骤为:①对土壤进行分类^[25];②划分前期土壤湿润状况^[25],查找对应的C_N值^[25-26],结果见表1。为了方便C_N值的获取,便于评价工作的进行,本研究选取AMC II作为土壤的前期湿润条件,贵州多年年平均降雨量取1098.6mm,计算得出的径流量Q即为年平均径流量。③根据公式(2)^[27]对C_N值进行校正,得到校正后的C_N值C'_N。

$$C'_N = \frac{\exp[0.00673(100 - C_N)] - 1}{3} \times [1 - 2\exp(-13.86\theta)] C_N + C_N \tag{2}$$

式中,θ为土地坡度。

表1 不同土地类别C_N值与L值

土地利用类别	不同土壤类别C _N 值				污染物输出 质量浓度/(mg·L ⁻¹)		
	A	B	C	D	ρ(N)	ρ(P)	L值
农村居民地	51	68	79	81	13.95	0.31	14.26
城镇居民地	61	75	83	87	16.67	0.67	17.34
林地	25	55	70	77	3.93	0.13	4.06
耕地	67	78	85	89	5.32	0.23	5.55
草地	49	69	79	84	4.23	0.21	4.44
园地	40	62	76	82	9.98	4.61	14.59
灌木林	36	60	73	79	4.35	0.13	4.48
裸地	68	79	86	89	6.47	0.05	6.52
水体	98	98	98	98	0	0	0

注:A为厚层黄土;B为薄层黄土或沙壤土;C为黏壤土;D为粉砂壤土。

2.2.2 土地利用影响因子的确定

非点源污染物的输出主要通过地表径流,其质量浓度受土地利用类型的影响很大^[28],土地利用影响因子反映的是不同下垫面对污染物流失的影响。本文中L值由不同土地利用类型土壤降雨径流中N、P的质量浓度确定,为两者之和。具体的数值,参照吕唤春等^[29-30]的研究所得,结果见表1。

2.2.3 距离影响因子的确定

距离影响因子反映了土地单元到河网间的距离,距离越近,则进入河流的潜在污染物就越多。本文采用核密度函数(Kernel Density)来确定距离影响因子。核密度函数在分析产业聚集和生态环境之间的关系^[31],以及分析路网密度对交通事故的影响^[32]中有大量运用。核密度函数不仅考虑了几何距离,也考虑了河网密度的作用,而且它已经被整合到ArcGIS10.0中,应用非常方便。

2.2.4 权重的确定

权重对最后的评价结果至关重要。PNPI 指标参数中对权重的确定,采用的是专家打分法^[33],但各区域的社会、经济、自然等条件是不同的,一个区域内的打分不一定适合另一个区域。本研究中采用改进的理想解法 (technique for order preference by similarity to ideal solution,TOPSIS) 来确定权重,但首先要对 L 、 D 、 Q 3 个因子进行归一化处理^[9]。

最后根据公式(1)得到非点源污染风险评价指数 L_1 , L_1 数值的范围为 0 ~ 1, 值越大, 则污染物流失风险越大, 故按照研究区的实际情况, 将流域进行非点源污染敏感区划分: 当风险评价指数 L_1 为 0.00 ~ 0.35 时, 划分为不敏感区; L_1 为 0.35 ~ 0.45 时, 划分为轻度敏感区; L_1 为 0.45 ~ 0.65 及 0.65 ~ 1.00 时, 分别划分为中度敏感区和重度敏感区。

3 结果与讨论

3.1 非点源污染现状评价

研究区水质参数和土壤养分的统计特征见

表 2 土壤养分及水质参数的统计特征及环境标准

参数	平均值/(mg·L ⁻¹)		标准差/(mg·L ⁻¹)		变异系数/%		GB3838—2002《地表水环境质量标准》/(mg·L ⁻¹)				
	枯	丰	枯	丰	枯	丰	I	II	III	IV	V
COD	4.10	3.35	7.48	3.92	182.31	117.08	15.00	15.0	20.0	30.0	40.0
DO	7.88	7.77	0.78	0.43	9.94	5.53	7.50	6.0	5.0	3.0	2.0
NH ₃ -N	0.38	0.96	0.88	0.36	234.59	37.01	0.15	0.5	1.0	1.5	2.0
TN	3.82	3.55	2.74	2.54	71.78	71.70	0.20	0.5	1.0	1.5	2.0
TP	0.02	0.36	0.01	0.29	92.01	80.69	0.02	0.1	0.2	0.3	0.4

参数	平均值/(g·kg ⁻¹)	标准差/(g·kg ⁻¹)	变异系数/%	土壤普查养分分级标准/(g·kg ⁻¹)				
				I	II	III	IV	V
全氮	4.02	1.98	49.25	2.00	1.50	1.00	0.750	0.500
全磷	0.67	0.43	63.24	1.00	0.80	0.60	0.400	0.200
有机质	58.81	26.43	47.13	40.00	30.00	20.00	10.000	6.000
碱解氮	0.12	0.54	44.75	0.15	0.12	0.09	0.060	0.030
有效磷	0.18	0.16	89.49	0.04	0.02	0.01	0.005	0.003

表 3 水质灰色关联评价结果

样点	j_0		J^*		样点	j_0		J^*		样点	j_0		J^*	
	枯	丰	枯	丰		枯	丰	枯	丰		枯	丰	枯	丰
W1	1	3	1.7120	3.4638	W19	3	4	2.7500	3.7879	W37	3	4	3.7126	3.8158
W2	1	4	2.0218	3.8511	W20	3		3.4800		W38	3	4	2.4681	3.6147
W3	1	5	3.4542	3.9024	W21	1	4	1.9610	3.6961	W39	3		3.5094	
W4	1	4	1.8000	3.6988	W22	1	4	1.8511	3.6814	W40	5	4	3.3871	3.5479
W5	1	4	3.1485	3.7264	W23	5	2	3.5000	3.4100	W41	5	4	2.8065	3.7000
W6	1		1.8378		W24	3	4	3.1852	3.7281	W42	5	4	3.4737	3.5508
W7	1	4	1.7778	3.7579	W25	3	4	3.6122	3.3993	W43	1	4	1.7273	3.6774
W8	1	4	1.8333	3.7500	W26	1	4	3.0741	3.7652	W44	1	3	1.5135	3.2889
W9	1		1.8000		W27	2	3	2.1831	3.6471	W45	1	4	1.7692	3.6899
W10	2	4	2.1579	3.6765	W28	2	3	1.9479	3.4598	W46	1	4	1.3614	3.4217
W11	1	4	1.8475	3.4865	W29	1	4	3.1783	3.8110	W47	4	4	3.1875	2.6154
W12	3	4	3.6667	3.7810	W30	1	5	1.9073	3.8864	W48	4	2	3.6849	2.8421
W13	4	4	3.9231	3.7672	W31	1	4	1.8714	3.6870	W49	1	3	1.6190	3.6471
W14	2		1.9189		W32	3	4	3.4800	3.6444	W50	1	3	1.8308	3.4598
W15	1	4	2.0870	3.5556	W33	1	1	1.8276	0.7000	W51	1	4	1.8800	3.8065
W16	1	4	1.4516	3.8125	W34	1	2	1.8160	2.6538	W52	5	4	3.5600	4.0182
W17	1	4	2.1111	3.6952	W35	1	2	2.0000	3.1489					
W18	1	4	1.4286	3.7879	W36	1	4	1.8545	3.5075					

表 2。从平均值来看,区域内土壤养分质量都在 I ~ III 类标准之间,说明区域内的土壤养分状况良好。水质中 TN 质量浓度超出 V 类标准;NH₃-N 质量浓度在丰水期达到 III 类标准,为枯水期的 2.53 倍;TP 质量浓度在丰水期达到 V 类标准,为 0.36 mg/L,而枯水期 TP 质量浓度为 0.02 mg/L,属于 I 类水质。可见,流域中污染物超标物质为 TN、NH₃-N、TP,而且丰水期 NH₃-N、TP 的质量浓度远大于枯水期。

根据表 2 中的数据,参照 GB3838—2002《地表水环境质量标准》,采用灰色关联评价法进行污染现状评价,得到灰色关联等级(j_0)和综合评分值(J^*)。土壤的综合评分值(J^*)符合正态分布,对其进行克里金插值,得到流域内土壤质量的分布情况,见图 2。水质的灰色关联评价结果见表 3。枯水期样点个数中,水质在 I 类标准(即 $j_0=1$) 的观测点占 59.62%,II ~ III 类占 15.38%,IV 类占 5.77%,V 类占 9.62%。丰水期时,水质以 IV 类居多,IV 类占 72.92%,I ~ III 类只占 22.91%,V 类占 4.17%。这说明流域中水质质量

的空间差异性大,在丰水期时随径流流失的污染物质质量浓度高,流域非点源污染较大,结合前面对水质参数平均值分析,可知流域内非点源污染主要对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 的贡献大,所以有必要对流域进行非点源污染敏感区域的划分,使非点源污染得到有效的控制。

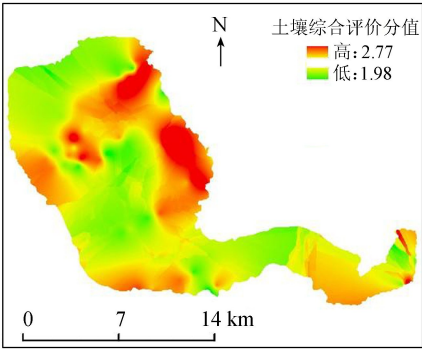
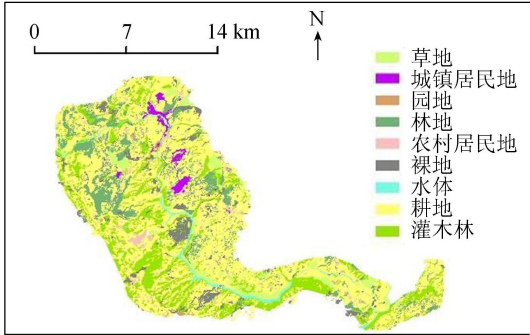


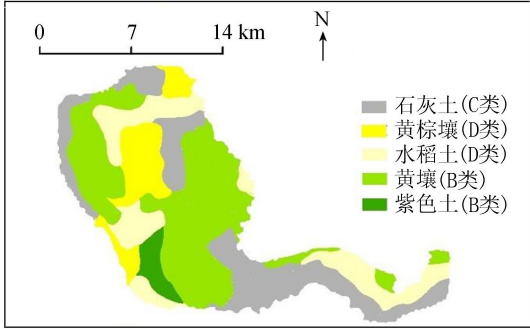
图2 土壤质量评价克里格插值结果

3.2 非点源污染风险评价与敏感分区

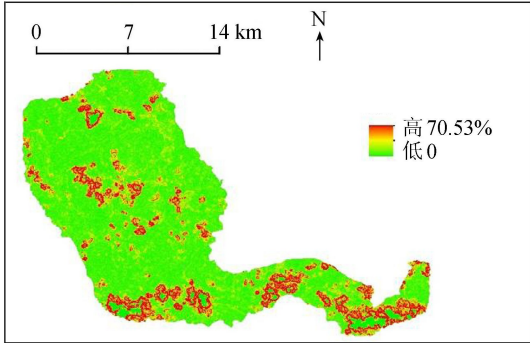
图3(a)、图3(b)、图3(c)分别为研究区的土



(a) 土地利用类型



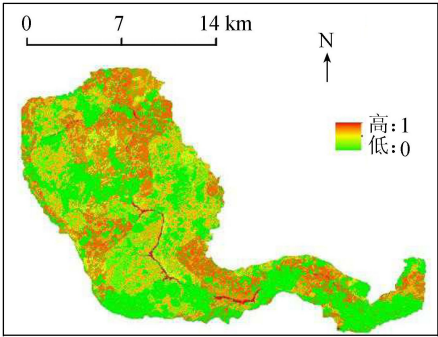
(b) 土壤类型



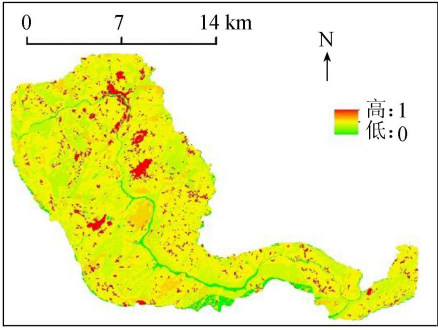
(c) 坡度

图3 基础数据

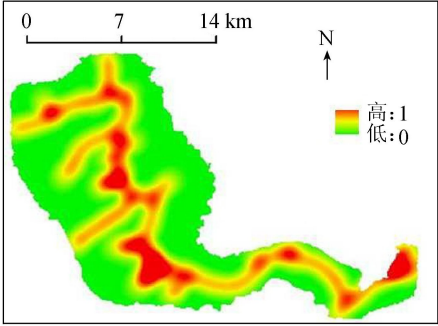
地利用类型、土壤类型和坡度数据。要确定研究区的径流影响因子(Q),首先要确定流域内石灰土的 C_N 参数选 C 类,黄壤和紫色土的 C_N 参数选 B 类,石灰土和水稻土为 D 类^[35],对土壤类型进行 SCS 水文土壤划分,得到校正前的 C_N 值。然后根据公式(2)和坡度数据(图3(c)),通过 ArcGIS 中 Spatial Analysis 模块的 Raster Calculator 进行 C_N 值的校正,得到校正后的 C_N 值图,最后得到径流量 Q ,归一化计算后生成 Q 因子分布图,见图4(a)。



(a) 径流因子



(b) 土地利用因子



(c) 距离因子

图4 评价因子 Q 、 L 、 D 的空间分布

计算土地利用影响因子(L),根据表1中的值在 GIS 中对不同土地利用类型进行赋值,归一化后得到 L 因子图,见图4(b)。距离影响因子(D)需要水系数据,见图1。打开水系图后,利用 ArcGIS 中的 Kernel Density 模块,创建一个光滑且每个栅格网格都有相应数值的密度分布图,归一化后得到距离影响因子图,见图4(c)。距离影响因子随着距河道距离的增加而减小,随河网密度的增加而增大。

权重的计算需要归一化后的 D 、 L 、 Q 值的数据, 计算后得到 $L_1 = 0.55L + 0.32Q + 0.13D$ 。通过 ArcGIS 中 Spatial Analysis 模块的 Raster Calculator, 生成相应的流域非点源分析评价结果, 结果的范围在 (0,1) 之间, 然后根据划分标准划分流域非点源污染敏感区, 见图 5。

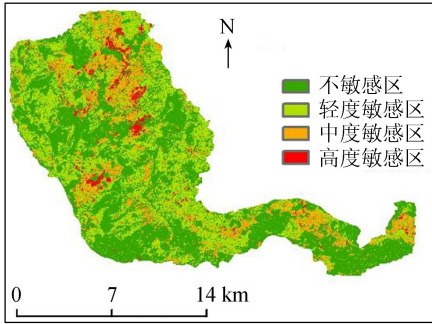


图 5 流域非点源污染敏感区划分结果

从图 5 可以发现研究区非点源污染敏感区分布的特征: ①中度和高度敏感区分布在距离水系近的地方, 不敏感区和轻度敏感区距离水系远; ②不敏感区和轻度敏感区分布地人为干扰少, 多为林地、灌木林、草地等; ③中度和高度敏感区分布的地方人为干扰大, 主要包括耕地和居民区聚集地。人类活动的集中, 使得下垫面产生了变动, 导致径流量和污染物质的输出发生改变, 使水体受到污染。这与实际情况相符。

4 结 论

a. 黔中水利枢纽工程水源地平寨水库保护区和准保护区水污染较为严重。水质的评价结果显示, 枯水期时 I 类水居多, 占观测点的 59.62%; 丰水期时水质以 IV 类居多, 占观测点的 72.92%。从时间变化上看, 丰水期水质要劣于枯水期, 超标指标主要为 TN 、 NH_3-N 、 TP , 流域水体表现出非点源污染的显著特征。土壤灰色关联评价的结果表明, 流域内土壤质量状况良好, 都在 III 类标准以内。

b. 在借鉴 PNPI 法计算机理的基础上, 对参评指标进行了适合研究区的适当改进, 计算了研究区非点源污染风险指数, 并划分为了 4 类非点源污染敏感区域。整体上, 距离河道越近且人为活动越集中的区域, 非点源污染风险指数越大, 区域非点源污染越敏感。敏感区域的划分便于对研究区进行有针对性的分区治理和合理的污染防控。

参考文献:

[1] 赵倩, 马建, 问青春, 等. 应用 AnnAGNPS 模型模拟柴河上游农业非点源污染[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(2): 344-251. (ZHAO Qian, MA Jian, WEN

Qingchun, et al. Modeling pollutant load and management alternatives in headwater of Chai River Watershed with AnnAGNPS[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(2): 344-251. (in Chinese))

[2] CSATHÓ P, SISAK I, ADIMSZKY L, et al. Agriculture as a source of phosphorus causing eutrophication in Central and Eastern Europe[J]. Soil Use and Management, 2007, 23(S1): 36-56.

[3] LENTZSCH P, WIELAND R, WIRTH S. Application of multiple regression and neural network approaches for landscape-scale assessment of soil microbial biomass[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37: 1577-1580.

[4] DITZLER C A, TUGEL A J. Soil quality field tools: experiences of US-DA-NRCS soil quality institute[J]. Agronomy Journal, 2002, 94(1): 33-38.

[5] 林绍霞, 林昌虎, 何腾兵, 等. 灰色关联度法在农业非点源污染土壤影响因子分析中的应用[J]. 水土保持通报, 2010, 30(4): 171-174. (LIN Shaoxia, LIN Changhu, HE Tengbing, et al. Application of grey relation grade in the analysis of soil factors influencing agricultural non-point source pollution[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(4): 171-174. (in Chinese))

[6] 赖坤容, 周维博. 灰色关联分析在延安市宝塔区延河段水质评价中的应用[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2010, 37(5): 570-572. (LAI Kunrong, ZHOU Weibo. Application of the grey association analysis method to the Yanhe water environmental quality assessment in Yan'an, Shanxi, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2010, 37(5): 570-572. (in Chinese))

[7] 张同娟, 杨劲松, 刘广明, 等. 基于灰色关联度法河口地区土壤盐分影响因子分析[J]. 土壤通报, 2010, 41(4): 793-795. (ZHANG Tongjuan, YANG Jingsong, LIU Guangming, et al. Application of grey system theory evaluating the influencing factors of soil salinity[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41(4): 793-795. (in Chinese))

[8] 张军, 梁川. 基于灰色关联系数矩阵的 TOPSIS 模型在水环境质量评价中的应用[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2009, 41(4): 97-101. (ZHANG Jun, LIAN Chuan. Application of TOPSIS model based on gray correlation coefficient matrix in the evaluation of water environmental quality[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2009, 41(4): 97-101. (in Chinese))

[9] 张汪寿, 耿润哲, 王晓燕, 等. 基于多准则分析的非点源污染评价和分区: 以北京怀柔区北宅小流域为例[J]. 环境科学学报, 2013, 33(1): 258-266. (ZHANG Wangshou, GENG Runzhe, WANG Xiaoyan, et al. Assessment and zoning of non-point source pollution by multi-criteria analysis: A case study in the watershed of Beizhai[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(1):

- 258-266. (in Chinese))
- [10] 洪华生,黄金良,张珞平,等. AnnAGNPS 模型在九龙江流域农业非点源污染模拟应用[J]. 环境科学,2005,26(4):63-69. (HONG Huasheng, HUANG Jinliang, ZHANG Luoping, et al. Modelling pollutant loads and management alternatives in Jiulong River Watershed with AnnAGNPS[J]. Environmental Science,2005,26(4):63-69. (in Chinese))
- [11] 王晓燕,秦福来,欧洋,等. 基于 SWAT 模型的流域非点源污染模拟:以密云水库北部流域为例[J]. 农业环境科学学报,2008,27(3):1098-1105. (WANG Xiaoyan, QIN Fulai, OU Yang, et al. SWAT-based simulation on non-point source pollution in the northern watershed of Miyun Reservoir [J]. Journal of Agro-Environment Science,2008,27(3):1098-1105. (in Chinese))
- [12] 薛亦峰,王晓燕,王立峰,等. 基于 HSPF 模型的大阁河流域径流量模拟[J]. 环境科学与技术,2009,32(10):103-107. (XUE Yifeng, WANG Xiaoyan, WANG Lifeng, et al. Runoff simulation on watershed of Dage River by HSPF model[J]. Environmental Science & Technology, 2009,32(10):103-107. (in Chinese))
- [13] MUNAFÒ M, Cecchi G, Baiocco F, et al. River pollution from non-point sources: A new simplified method of assessment [J]. Journal of Environmental Management. 2005,77(2):93-98.
- [14] 丁晓雯,沈珍瑶. 涪江流域农业非点源污染空间分布及污染源识别[J]. 环境科学,2012,33(11):4025-4031. (DING Xiaowen, SHEN Zhenyao. Spatial distribution and pollution source identification of agricultural non-point source pollution in Fujiang Watershed[J]. Environmental Science,2012,33(11):4025-4031. (in Chinese))
- [15] 李本云,吴攀,张翊鹏,等. 黔中水利枢纽工程平寨水库集水流域溶解态重金属特征及健康风险评估[J]. 安全与环境学报,2013,13(3):122-126. (LI Benyun, WU Pan, ZHANG Chipeng, et al. Features of the dissolved heavy-metal pollutants and health risk assessment of Pingzhai Reservoir Basin in Central Guizhou [J]. Journal of Safety and Environment, 2013,13(3):122-126. (in Chinese))
- [16] 刘鸿雁,刘奇,毛健全. 乌江流域水资源、水质变化与水库建设关系分析[J]. 水资源保护,2010,26(3):18-22. (LIU Hongyan, LIU Qi, MAO Jianquan. Study on relationship between water resources, water quality changes and reservoir construction in Wujiang Basin[J]. Water Resources Protection, 2010,26(3):18-22. (in Chinese))
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000.
- [18] 张静,孙省利. 海水环境质量模糊-灰色关联评价及应用[J]. 广东海洋大学学报,2011,31(6):68-72. (ZHANG Jing, SUN Xingli. Fuzzy-grey correlation evaluation and its application to seawater environmental quality[J]. Journal of Guangdong Ocean University,2011,31(6):68-72. (in Chinese))
- [19] 于洪涛,吴泽宁. 灰色关联分析在南水北调中线澧河水水质评价中的应用[J]. 节水灌溉,2010(3):39-41. (YU Hongtao, WU Zening. Application of grey relation analysis method in water quality evaluation of Li River for South-to-North Water Diversion Project [J]. Water Saving Irrigation,2010(3):39-41. (in Chinese))
- [20] 申剑,史淑娟,周扬,等. 基于改进灰色关联分析法的丹江口流域地表水环境质量评价[J]. 中国环境监测,2014,30(5):41-46. (SHEN Jian, SHI Shujuan, ZHOU Yang, et al. Surface water environmental quality assessment of Danjiangkou Valley based on improved grey correlation analysis [J]. Environmental Monitoring in China,2014,30(5):41-46. (in Chinese))
- [21] IP W C, HU B Q, WONG H, et al. Applications of grey relational method to river environment quality evaluation in China[J]. Journal of Hydrology, 2009,379:284-290.
- [22] 王晓凤,邵红兵,夏训峰. 聊城市城市地表径流污染负荷估算[J]. 环境科学与技术,2012,35(3):164-167. (WANG Xiaofeng, SHAO Hongbing, XIA Xunfeng. Estimation of Liaocheng urban non-point source pollution load[J]. Environmental Science & Technology, 2012,35(3):164-167. (in Chinese))
- [23] 马东,杜志勇,吴娟,等. 崂山水库流域不同土地利用类型地表径流的氮磷流失特征[J]. 水土保持学报,2011,25(6):31-39. (MA Dong, DU Zhiyong, WU Juan, et al. Losses characters of nitrogen and phosphorus in runoff with different land use pattern in Watershed of Laoshan Reservoir[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011,25(6):31-39. (in Chinese))
- [24] 温海广,周劲风,李明,等. 流溪河水库流域非点源溶解态氮磷污染负荷估算[J]. 环境科学研究,2011,24(4):387-394. (WEN Haiguang, HOU Jinfeng, LI Ming, et al. Estimation of non-point soluble nitrogen and phosphorus pollutant loads in the drainage area of Liuxi River Reservoir[J]. Research of Environmental Sciences,2011,24(4):387-394. (in Chinese))
- [25] 袁作新. 流域水文模型[M]. 北京:水利电力出版社,1990:142-149.
- [26] 史培军,袁艺,陈晋. 深圳市土地利用变化对流域径流的影响[J]. 生态学报,2001,21(7):1041-1049. (SHI Peijun, YUAN Yi, CHEN Jin. The effect of land use on runoff in Shenzhen City of China [J]. Acta Ecologica Sinica,2001,21(7):1041-1049. (in Chinese))
- [27] ZHANG H, HUANG G H. Assessment of non-point source pollution using a spatial multicriteria analysis approach[J]. Ecological Modelling, 2011,222(2):313-321.

(下转第 110 页)

- phosphorus in the main rivers entering Chaohu Lake[J]. Trace Elements Science, 2003, 10 (4) : 41-44. (in Chinese))
- [8] 魏复盛.水和废水监测分析方法[M].4 版.北京:中国环境科学出版社,2002:96-97,346-347,226-227.
- [9] 金相灿,屠清瑛.湖泊富营养化调查规范[M].2 版.北京:中国环境科学出版社,1990:160-164.
- [10] 温天红.强化混凝技术处理微污染水源水研究[D].昆明:昆明理工大学,2007:12-14.
- [11] 李晓波,吴水波,顾平.铁盐和铝盐混凝微滤工艺除 As (V) 的比较研究[J].环境科学,2007,10(28):2198-2202. (LI Xiaobo, WU Shuibao, GU Ping. Arsenic (V) removal from drinking water by ferric salt and aluminum salt coagulation microfiltration process[J]. Environmental Science,2007,10(28):2198-2202. (in Chinese))
- [12] 皇甫静巧.新型助凝剂在水处理中的应用[D].上海:同济大学,2007.3-7.
- [13] 湛含辉,李小彬,戴财胜,等.有机絮凝剂的混凝机理研究[J].煤炭科学技术,2004,32(1):35-37. (ZHAN Hanhui, LI Xiaobin, Dai Caisheng, et al. Coagulation mechanism of organic flocculant[J]. Coal Science and Technology,2004,32(1):35-37. (in Chinese))
- [14] 唐晓静.处理低浊闽江原水的混凝剂和助凝剂选择实验[J].福建建筑,2008,126(12):117-121. (TANG Xiaojing. The selecting tests of coagulants and coagulant aids for the treatment of low turbidity Min river primary water[J]. Fujian Architecture & Construction,2008,126(12):117-121. (in Chinese))
- [15] 魏星.铝盐铁盐的混凝机理及特性探讨[J].煤矿环境保护,1995,10(3):60-63. (WEI Xin. Aluminum salt coagulation mechanism and characteristic of iron salts[J]. Coal Mine Environmental Protection,1995,10(3):60-63. (in Chinese))
- [16] 赵艳梅,刘起峰,李涛,等.混凝强化除磷的模拟实验研究[J].环境工程学报,2007,1(5):11-14. (ZHAO Yanmei, LIU Qifeng, LI Tao, et al. Phosphorus removal by enhanced coagulation in smulative and treated wastewater [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2007,1(5):11-14. (in Chinese))
- [17] 张燕.无机-有机复合混凝剂 PAC/PFC-PAM 去除南淝河水体中磷的研究[D].南京:南京理工大学,2013:18-19.
- [18] 何斐,李磊,许炎华.强化混凝去除微污染水源水中有机的研究进展[J].安徽农业大学学报,2008,35(1):119-123. (HE Fei, LI Lei, XU Yanhua. Progress on removal of organic matter in micro-polluted source water by enhanced coagulation[J]. Journal of Anhui Agricultural University,2008,35(1):119-123. (in Chinese))
- [19] 周玲玲,张永吉,孙丽华,等.铁盐和铝盐混凝对水中天然有机物的去除特性研究[J].环境科学,2008,29(5):1187-1191. (ZHOU Lingling, ZHANG Yongji, SUN Lihua et al. Characteristic of natural organic matter removal by ferric and aluminium coagulation [J]. Environmental Science, 2008, 29 (5) : 1187-1191. (in Chinese))

(收稿日期:2014 - 03 - 11 编辑:高渭文)

(上接第 93 页)

- [28] 曾立雄,黄志霖,肖文发,等.三峡库区不同土地利用类型氮磷流失特征及其对环境因子的响应[J].环境科学,2012,33(10):3390-3395. (ZENG Lixiong, HUANG Zhilin, XIAO Wenfa, et al. Nitrogen and phosphorus loss in different land use types and its response to environmental factors in the Three Gorges Reservoir Area [J]. Environmental Science,2012,33(10):3390-3395. (in Chinese))
- [29] 吕唤春,薛生国,方志发,等.千岛湖流域不同土地利用方式对氮和磷流失的影响[J].中国地质,2004,31(增刊1):112-117. (LYU Huanchun, XUE Shengguo, FANG Zhifa, et al. Influence of different land use patterns upon nitrogen and phosphorus loss in the Qiandaohu Drainage Area[J]. Geology in China,2004,31(Sup1): 112-117. (in Chinese))
- [30] 耿润哲,王晓燕,吴在兴,等.北运河下游不同土地利用非点源污染负荷估算[J].农业环境科学学报,2012,31(7):1412-1420. (GENG Runzhe, WANG Xiaoyan, WU Zaixing, et al. Non-point source pollution loads from the different land use type in the downstream areas of the Beiyunhe River Basin, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31 (7) : 1412-1420. (in Chinese))
- [31] 高爽,魏也华,陈雯,等.发达地区制造业集聚和水污染的空间关联:以无锡市区为例[J].地理研究,2011,30(5):902-911. (GAO Shuang, WEI Yehua, CHEN Wen, et al. Study on spacial-correlation between water pollution and industrial agglomeration in the developed region of China: A case study of Wuxi City [J]. Geographical Research,2011,30(5):902-911. (in Chinese))
- [32] GAO C, ZHU J G, ZHU J Y, et al. Nitrogen export from an agriculture watershed in the Taihu Lake Area, China [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2004, 26 (2) : 199-207.
- [33] 李婷,武晓峰.基于 PPI 的河段水体潜在污染研究[J].环境科学,2010,31(11):2619-2626. (LI Ting, WU Xiaofeng. Study on the potential pollution in river section based on PPI[J]. Environmental Science,2010,31(11):2619-2626. (in Chinese))
- [34] 贵州省农业厅,中国科学院南京土壤研究所.贵州土壤[M].贵阳:贵州人民出版社,1980:28-98.

(收稿日期:2014 - 09 - 17 编辑:彭桃英)