

DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2022.01.010

引用格式:李剑锋,朱玉晨,刘春雷,等. 晋江流域生态环境脆弱性评价[J]. 华东地质, 2022,43(1):94-101.(LI J F, ZHU Y C, LIU C L, et al. Vulnerability assessment of ecological environment of Jinjiang River Basin[J]. East China Geology, 2022, 43(1):94-101.)

晋江流域生态环境脆弱性评价

李剑锋^{1,2}, 朱玉晨¹, 刘春雷¹, 李亚松¹, 郝奇琛^{1,2}, 李政红²

(1.中国地质科学院水文地质环境地质研究所,河北 石家庄 050061;

2.自然资源部地下水科学与工程重点实验室,河北 石家庄 050061)

摘要: 针对晋江流域的生态地质问题,应用 Getis-Ord G_i^* 统计模型、Calinski-Harabasz 指数评价聚类模型等评价方法,从脆弱性分级、主控因素、聚集特征三方面开展脆弱性评价,建立晋江流域生态环境脆弱性评价模型。整体来看,晋江流域西溪比东溪脆弱,上游比下游脆弱;晋江流域东南部城市聚集区脆弱性的主控因素为建筑用地、初级生产力与土壤有机质,中西部茶叶种植区的主控因素为茶叶的过度种植;脆弱性高值聚集区域在安溪县感德镇以及永春县湖洋镇一带。在上述分析的基础上,对晋江流域茶园种植分布现状合理性进行评估,给出具体的茶园空间优化建议。

关键词: 晋江流域;脆弱性评价;聚类分析;Getis-Ord G_i^* 统计模型;Calinski-Harabasz 指数评价聚类模型;茶叶种植空间优化

中图分类号:X171.1

文献标识码:A

文章编号:2096-1871(2022)01-094-08

近年来,我国经济经历了飞速的发展,在发展的同时,引发的水土流失、环境污染、植被退化等一系列生态问题威胁着人类赖以生存的环境^[1]。在这种环境下,学者从多角度开展了生态环境脆弱性研究。从研究尺度上看,省、市以及重点地区、城市群均有学者开展研究:陆海燕^[2]、任源鑫等^[3]以省级单位为评价单元,分别开展了新疆维吾尔自治区、陕西省的生态脆弱性研究;王贝贝等^[4]以市为研究单元,对南昌市开展脆弱性评价研究;张慧琳等^[5]、周玲美等^[6]以地区作为评价单元,分别对山西五台山地区、内蒙古呼日查干淖尔地区开展脆弱性评价研究。从评价体系看,多采用 SRP 概念模型^[2-5]来搭建评价体系,主成分分析法^[4]、综合复权法^[3]、层次分析法^[6]等也有学者采用。POLSKY C 等^[7]受美国公共空间计划整合框架的启示,发展了基于“暴露-敏感-适应”的 VSD (Vulnerability

Scoping Diagram)评价整合模型。

晋江流域是典型的南方丘陵地区,多山地、丘陵。素有“中国茶叶之都”之称的安溪县就位于晋江流域的上游。然而,在茶叶产业发展的过程中,由于土地利用不当,茶园过度开发,出现了大面积红壤严重退化、水土流失、滑坡侵蚀等诸多环境问题^[8]。本文依托地质调查项目“厦漳泉同城化地区综合地质调查”,以福建省晋江流域作为评价区,基于“暴露性-易损性-恢复力”三个维度开展评价,应用 Getis-Ord G_i^* 统计模型、Calinski-Harabasz 指数评价聚类模型等评价方法进行分析,为流域尺度上开展脆弱性评价提供了新思路。

1 研究区概况

晋江流域主要位于福建省泉州市(图 1),地势西北高、东南低,既有低山丘陵,又有高峰峡谷,河

* 收稿日期:2021-08-09 修订日期:2021-10-12 责任编辑:叶海敏

基金项目:中国地质调查局“厦漳泉同城化地区综合地质调查(编号:DD20190303)”项目资助。

第一作者简介:李剑锋,1984年生,男,助理研究员,博士,主要从事定量地学研究。Email:lichris99@foxmail.com。

通信作者简介:朱玉晨,1986年生,男,助理研究员,硕士,主要从事地理信息系统及数值模拟研究。Email:zhuyuchen413@163.com。

流盆地穿插其中。有东溪和西溪两大支流,于南安市双溪口汇入晋江干流,水系具有格子状扇形水系的特征,流域面积为 5 600 km²。晋江流域地处低纬度地区,东临海洋,属于中亚热带海洋性季风气候,冬短夏长,光热丰富,降雨充沛,降雨量年际间变化率大,季风气候显著,干、湿季分明。土壤主要类型以南园属红壤、河田属红壤、魁岐属红壤为主,其他为老红壤、赤红壤、黄红壤、潮土、盐土、黄赤土等土壤类型。植被主要有亚热带季雨林和亚热带常绿阔叶林,以次生林和人工林为主,杉木林、马尾松林、建柏林等人工林也较为常见。

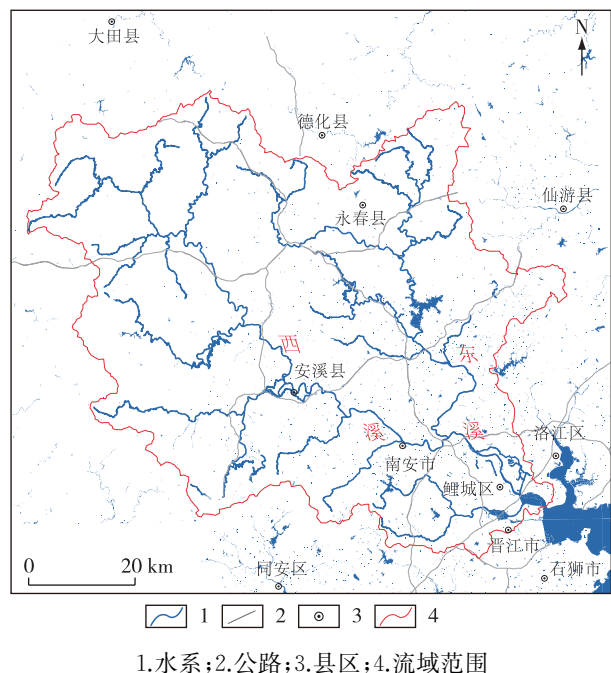


图1 晋江流域地理位置图

Fig. 1 Geographical location of Jinjiang River Basin

2 评价指标体系构建

2.1 影响因素分析

生态系统脆弱性是由多种因素综合作用引起的,从外界威胁的程度、自我保护的能力与受到破坏后的恢复力 3 方面考虑,可将脆弱性划分为暴露性、易损性和恢复力^[9-10]。

暴露性反映了生态系统遭受外界的影响和破坏程度,主要包含自然破坏与人为破坏。自然破坏

方面,降雨量是引发水土流失等生态地质问题的首要条件,因此降雨量越大,生态地质问题发生的可能性就越大。人为破坏分为 2 类:一类是由于人类生活导致的生态系统破坏,从空间分布角度看,海拔 200~500 m、起伏度 50~200 m 为丘陵地带,该区域是人类活动最频繁的区域;另一类是人类生产行为对自然的破坏,晋江流域是茶叶的重要产地,由于不合理的开发导致茶园易发生生态地质问题,茶园种植面积越大,该地区受到的生态风险也越大。从土地利用类型来看,建设用地是人类改造自然的区域,这两类区域都是生态地质问题易发的区域。

易损性是生态系统受到外界影响破坏时自身的抗干扰能力,取决于环境自身的属性特征。坡度越陡的地区越容易发生地质灾害,易损性越高。不同土壤类型对水土保持、植被发育、生态适宜性也有所区别,适宜性差的区域,受到外界胁迫时更易受损。土壤有机质不同的区域土壤保肥性不同,有机质越高的区域植被生长越好,生态条件越稳定,易损性越低。

恢复力指的是生态系统在遭受外界破坏后的自我恢复能力和调节能力,植被初级生产力是植物通过光合作用生产有机物质的总量,是估算地球支持能力和评价陆地生态系统可持续发展的重要指标,植被初级生产力越高,生态系统恢复的可能性越大,恢复的也越快。

综上所述,选择降雨量、丘陵面积比、茶园种植面积比、建设用地面积比、坡度、土壤类型、土壤有机质与植被初级生产力 8 个指标建立脆弱性评价指标体系。

2.2 评价指标权重

晋江流域生态系统脆弱性评价指标体系中各个指标的权重采用层次分析法确定^[11]。根据模型选定的评价指标,将评价指标两两比对,建立判断矩阵(表 1)。首先,对判断矩阵进行一致性检验,判断矩阵是否具有-致性,通常采用计算 CI 及 CR 值的方法,当 $CR \leq 0.1$ 时具有可接受的一致性。经计算 $\lambda_{\max} = 8.05$, $CI = (\lambda_{\max} - 10)/9 = 0.0072$,查询 8 阶判断矩阵 $RI = 1.41$,得到 $CR = CI/RI = 0.0051$,满足 CR 值 ≤ 0.1 ,满足一致性要求。由此得到各指标图层及综合权重值(表 2)。

表 1 层次分析判断矩阵

Table 1 AHP judgment matrix

	降雨量/ mm	丘陵面积 比/%	茶园种植 面积比/%	建设用地 面积比/%	坡度/°	土壤类型/ %	土壤有机质/ (g·kg ⁻¹)	初级生产力/ (gC·m ⁻²)
降雨量/mm	1.00	0.50	0.50	2.00	1.00	2.00	1.00	1.00
丘陵面积比/%	2.00	1.00	0.50	2.00	1.00	2.00	1.00	1.00
茶园种植面积比/%	2.00	2.00	1.00	4.00	2.00	4.00	2.00	2.00
建设用地面积比/%	0.50	0.50	0.25	1.00	0.50	1.00	0.50	0.50
坡度/°	1.00	1.00	0.50	2.00	1.00	2.00	1.00	1.00
土壤类型/%	0.50	0.50	0.25	1.00	0.50	1.00	0.40	0.50
土壤有机质/(g·kg ⁻¹)	1.00	1.00	0.50	2.00	1.00	2.50	1.00	1.00
初级生产力/(gC·m ⁻²)	1.00	1.00	0.50	2.00	1.00	2.00	1.00	1.00

表 2 晋江流域生态脆弱性评价指标及权重

Table 2 Index weight of ecological vulnerability assessment in Jinjiang

River Basin			
一级指标	权重	二级指标	权重
暴露性	0.56	降雨量/mm	0.12
		丘陵面积比/%	0.14
		茶园种植面积比/%	0.25
		建设用地面积比/%	0.06
		坡度/°	0.12
易损性	0.31	土壤类型/%	0.06
		土壤有机质/(g·kg ⁻¹)	0.13
恢复力	0.12	初级生产力/(gC·m ⁻²)	0.12

表 3 数据来源

Table 3 Data source

数据类型	年份	数据来源	数据精度
降雨量数据	2018	福建省水资源公报 ^[12]	500 m
高程数据	2019	NASA EarthData ^[13]	30 m
丘陵面积比	2019	根据高程数据计算	30 m
遥感影像数据	2019	Google Earth	0.4 m
茶园种植面积比	2019	根据遥感影像数据目视解译	0.4 m
建设用地面积比	2019	根据遥感影像数据目视解译	0.4 m
坡度	2019	根据高程数据计算	30 m
土壤类型	2009	南京土壤所 ^[14]	1 000 m
土壤有机质	2012	北京大学城市与环境学院地理数据平台 ^[15]	30"
初级生产力	2002— 2019	国家青藏高原科学数据中心 ^[16]	1 000 m

3 脆弱性评价

3.1 数据收集与处理

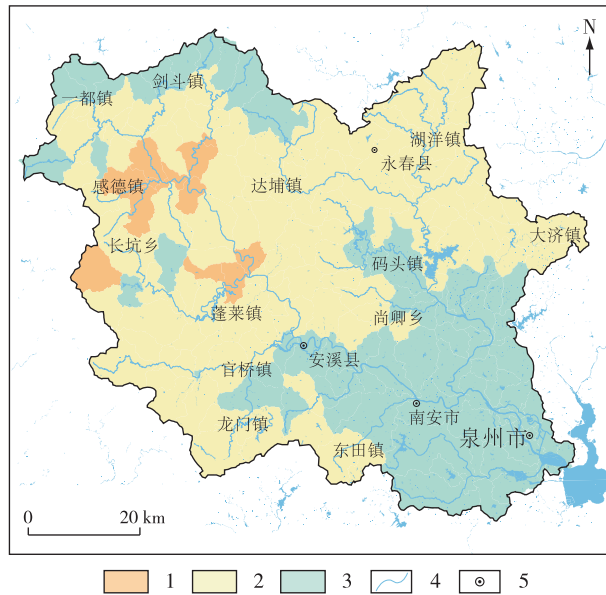
系统收集研究区用于脆弱性评价的数据,包括多年平均降雨量、研究区高程、植被初级生产力、遥感影像、土壤类型、土壤有机质等数据(表 3)。对遥感影像数据进行解译,获取了研究区茶园种植区分布图与建设用地分布图,进而统计各类面积比值。

3.2 脆弱性评价分区

在晋江流域脆弱性指数的基础上,将晋江流域生态环境按照生态环境脆弱性指数的高低分为脆弱性较高分区、脆弱性中等分区、脆弱性较低分区 3 个级别(图 2)。本文采用自然断点分级法,该方法在考虑了数据聚类特征的基础上,进一步兼顾了数据的数量与范围。

通过脆弱性分析可知,安溪县感德镇、长坑乡、蓬莱镇所在的子流域脆弱性最高,南安市南部到泉州市的平原区脆弱性较低,其他地区脆弱性一般。整体来看,西溪比东溪脆弱,上游比下游脆弱。

安溪县几个乡镇脆弱性较高的主要原因是受茶园种植以及土壤性质的影响。这几个乡镇的主要土壤类型为河田属红壤,土层中富含白色石英砂,茶园垦殖过程中常年铲除杂草,雨后细土随地表径流流失,土壤逐渐砂化。由于茶树的聚铝性特征^[17],导致茶园表土迅速酸化,进而加剧土壤表层肥力的退化。茶园的开采对区域的原生植被有破坏作用,植被覆盖信息与初级生产力指标均表明这几个乡镇恢复力一般,特别是感德镇与长坑乡,初级生产力与植被覆盖指标均较差,更加凸显了脆弱性。



1.脆弱性较高分区;2.脆弱性中等分区;3.脆弱性较低分区;4.河流;5.县市

图 2 晋江流域生态环境脆弱性分级图

Fig. 2 Ecological geological vulnerability classification of Jinjiang River Basin

4 生态环境脆弱性评价

4.1 基于多维伪 F 统计量动态 K-均值聚类分析算法的脆弱性主导因素识别

基于上述评价模型可知,影响晋江流域生态环境脆弱性的二级指标共 8 种,为了分析影响研究区脆弱性在不同子流域的特点,对这些指标进行聚类分析^[18],以便深入了解研究区不同位置的脆弱性主导因素。

研究采用基于多维伪 F 统计量动态 K-均值聚类分析算法。K-均值聚类分析算法是一种广泛应用于数据聚类分析的迭代变换算法,通过指定类别数 K,基于给定的聚类目标函数,采用迭代更新的方法,使得最终聚类结果目标函数值为极小值,达到较优的聚类效果^[19-20]。类别数 K 通过 Calinski-Harabasz 指数评价聚类模型^[21]多维伪 F 统计量来确定(表 4)。

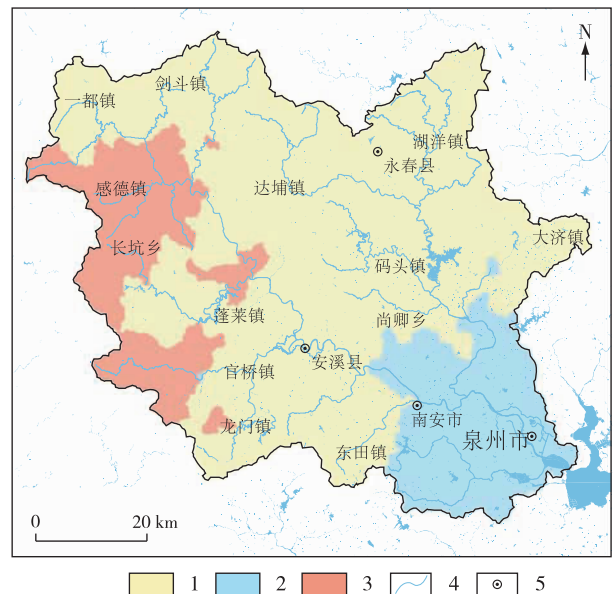
对聚类模型来说,通常聚类结果为同一类的数据距离越近越好,而不同类别的数据距离越远越好,伪 F 统计量反映的是聚类间方差和聚类内方差

的比率,即反映组内相似性和组间差异的比率。该值越大,代表组内越紧密,不同组之间的差异越大,即有更优的聚类结果。二级指标的伪 F 统计值结果显示,随着类别数量增加,伪 F 统计值呈逐渐降低的趋势,即将研究目标分为 3 类时,分类效果最好。由此选定 K 值为 3,进行 K-均值聚类分析,得到聚类分布图(图 3)。

表 4 伪 F 统计量汇总表

Table 4 Summary of pseudo-F statistics

分组数	平均值	最小值	最大值	中值
3	86.160 1	63.716 4	89.458 7	89.110 1
4	76.155 9	62.448 8	81.614 9	78.534 2
5	69.577 6	53.624 0	78.727 0	71.603 1
6	68.491 3	55.838 9	74.896 7	71.055 4
7	65.733 5	54.576 1	72.573 3	67.581 1
8	64.310 3	58.805 9	68.446 2	63.414 4
9	61.661 7	56.972 4	66.848 0	61.838 3
10	58.717 7	56.579 7	62.545 9	58.441 2
11	56.718 5	53.111 2	60.835 4	56.098 9
12	53.529 1	50.240 2	58.382 7	52.626 5
13	52.242 9	47.898 7	58.075 2	51.891 3
14	52.302 8	46.859 1	57.513 4	51.648 3
15	50.108 3	44.225 6	55.713 0	49.950 5



1.组 1;2.组 2;3.组 3;4.河流;5.县市

图 3 研究区二级指标聚类分布图

Fig. 3 Cluster distribution of secondary indicators

组 1 为研究区中部大部分地区,面积 3 862 km²,占研究区面积的 68.88 %;组 2 为东南部城市聚集区,面积 915 km²,占研究区面积的 16.33 %;组 3 为研究区西部剑斗镇、长坑乡、西坪镇等茶叶种植区,面积 829 km²,占研究区面积的 14.79 %。创建基于组汇总的变量统计值见表 5。

表 5 基于组汇总的变量统计值

Table 5 Variable statistics based on group summary

变量	组别	平均值	标准差	最小值	最大值	标准距离
降雨量/mm	全局	0.07	0.03	0.00	0.12	0.70
	组 1	0.09	0.01	0.05	0.12	0.53
	组 2	0.03	0.02	0.00	0.08	0.66
	组 3	0.08	0.01	0.07	0.11	0.27
	全局	0.04	0.03	0.00	0.14	0.22
丘陵面积比/%	组 1	0.05	0.03	0.00	0.13	0.98
	组 2	0.01	0.01	0.00	0.05	0.39
	组 3	0.05	0.04	0.00	0.14	1.00
茶园种植面积比/%	全局	0.03	0.05	0.00	0.25	0.71
	组 1	0.01	0.01	0.00	0.07	0.30
	组 2	0.00	0.01	0.00	0.07	0.28
	组 3	0.12	0.05	0.04	0.25	0.85
建设用地面积比/%	全局	0.01	0.01	0.00	0.06	0.66
	组 1	0.01	0.01	0.00	0.02	0.40
	组 2	0.03	0.01	0.00	0.06	0.95
	组 3	0.00	0.00	0.00	0.01	0.16
坡度/°	全局	0.07	0.03	0.00	0.12	0.60
	组 1	0.08	0.02	0.03	0.12	0.78
	组 2	0.03	0.02	0.00	0.12	0.95
	组 3	0.09	0.01	0.06	0.11	0.38
土壤类型/%	全局	0.03	0.02	0.00	0.06	0.04
	组 1	0.03	0.01	0.02	0.06	0.67
	组 2	0.03	0.02	0.00	0.06	0.98
	组 3	0.04	0.02	0.02	0.06	0.67
土壤有机质/(g·kg ⁻¹)	全局	0.05	0.02	0.00	0.13	0.23
	组 1	0.05	0.01	0.00	0.12	0.89
	组 2	0.06	0.02	0.04	0.13	0.67
	组 3	0.04	0.01	0.00	0.05	0.41
初级生产力/(gC·m ⁻²)	全局	0.06	0.03	0.00	0.12	0.62
	组 1	0.04	0.02	0.00	0.10	0.84
	组 2	0.11	0.02	0.07	0.12	0.41
	组 3	0.06	0.01	0.03	0.08	0.42

基于统计表反映出,组 2 的主导因素前三名分别为建设用地面积比、初级生产力与土壤有机质,坡度与降雨量的影响很小,充分反映了组 2 作为城市聚集区的特点:建设用地面积比非常高,同时由于城市化对于土地的破坏,初级生产力与土壤有机质均非常低,在城市聚集区,脆弱性主要体现为居民活动所造成的影响。因此,改善城市聚集区的脆弱性应当从以下方面入手:减缓土地的占用、植树造林增加植被覆盖以及土壤修复。组 3 的主导因素为茶园,相对于其他因素非常突出,其他因素则相差不大,组 3 所反映的区域恰为研究区内茶叶种植密集的区域,说明茶叶的过度种植对生态环境脆弱性的影响非常大,需要合理规划,适度科学种植,避免过度种植引发生态破坏与灾害^[22]。组 1 为研究区的中部大部分地区,从统计指标来看,各项要素较为均衡,差别较小,没有出现特别突出的主导因素,说明在研究区的大部分区域,各项二级指标对脆弱性共同产生作用,在各方面均需要适度注意。

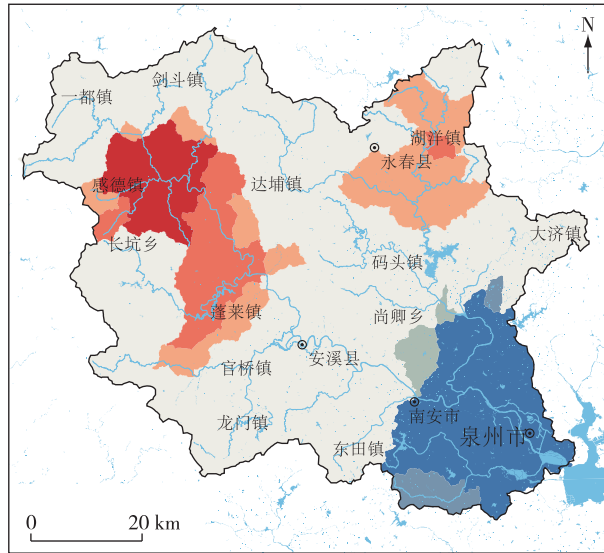
4.2 基于 Getis-Ord Gi* 统计模型显著性热点分析的脆弱性聚集评价

应用 Getis-Ord Gi* 统计模型对研究区评价结果进行统计显著性分析,开展晋江流域脆弱性较高区域与较低区域的聚集特征评价(图 4)。Getis-Ord Gi* 是一种用于识别具有统计显著性的高值(热点)和低值(冷点)的空间聚类统计方法,它通过自动聚合数据,识别适当的分析范围,并纠正多重测试和空间依赖性,对数据进行查询,以确定可优化热点分析结果的设置^[23]。对本研究来说,生态环境脆弱性指数作为评价数据,评价模型结果的高值区,即热点区域,代表了脆弱性相对较高的聚集区域。低值区,即冷点区域,代表了脆弱性相对较低的聚集区域。

晋江流域统计显著性的聚类分析结果表明,脆弱性高值聚集区分布在感德镇—蓬莱镇一带以及永春县湖洋镇一带。其中,感德镇是最高的脆弱性高值聚集区,该区域即为晋江流域脆弱性最为聚集的区域。

5 茶园种植优化建议

综上所述,本文对晋江流域茶园种植分布现状合理性进行了评估。其中,生态地质脆弱性高、坡度、植被初级生产力、土壤有机质含量与高程较低的茶园种植区,不宜进行茶叶种植,建议作为茶



1.热点区间(99%置信);2.热点区间(95%置信);3.热点区间(90%置信);4.无明显特征区间;5.冷点区间(90%置信);6.冷点区间(95%置信);7.冷点区间(99%置信)

图 4 晋江流域统计显著性分布图

Fig. 4 Statistical significance distribution of Jinjiang River Basin

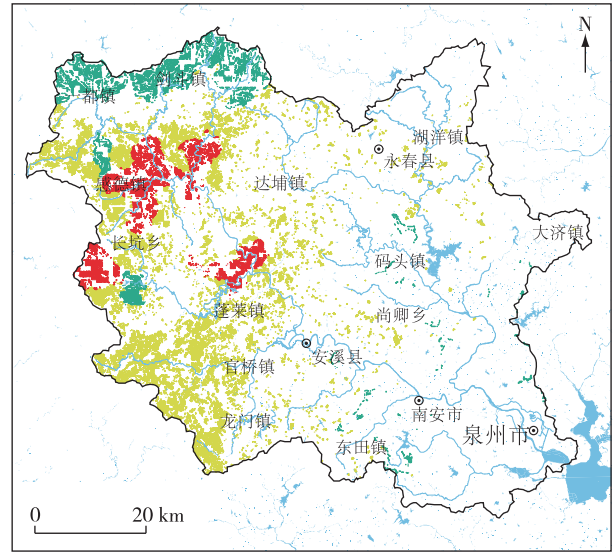
叶种植调整优化区。位于生态地质脆弱性中等的茶园种植区,对生态地质系统影响不突出,建议作为维持现状区。而对于晋江流域中生态地质脆弱性低、坡度较低、植被初级生产力与土壤有机质含量较高的区域,生态恢复力高,脆弱性低,具有较好的种植条件,作为适度扩大种植区。根据以上原则,分析得到晋江流域茶园种植建议面积统计表(表 6)和优化建议图(图 5)。

表 6 茶园种植建议面积统计表

Table 6 Statistical table of tea plantation recommended area

	茶叶种植调整优化 区面积/km ²	维持现状区 面积/km ²	适度扩大种植 区面积/km ²
西溪流域	53.18	157.03	84.61
东溪流域	0	10.97	2.45
总面积	53.18	168.00	87.06

建议茶园种植调整优化区面积 53.18 km²,主要分布在感德镇、金谷镇、长坑乡、金谷镇四个乡镇与剑斗镇南部;维持现状区面积 168.00 km²,主要位于桃舟乡、剑斗镇北侧、玉斗镇、西坪镇、虎邱镇等地区;适度扩大种植区主要分布在一都镇、下洋



1.茶叶种植调整优化区;2.维持现状区;3.适度扩大种植区;4.河流;5.县市

图 5 晋江流域茶园种植优化建议图

Fig. 5 Suggestions for tea planting optimization in Jinjiang River Basin

镇、桂阳镇、以及蓝田乡,总面积约为 87.06 km²,面积较大,即使扩大种植业仍需要避免过度集中。

6 结论

(1)晋江流域脆弱性分级结果显示,脆弱性较高的区域为感德镇、长坑乡、蓬莱镇,南安市南部至泉州市的平原区脆弱性较低,整体来看,西溪比东溪脆弱,上游比下游脆弱。

(2)晋江流域的脆弱性条件在不同的地区有着不同的主导要素,可分为 3 种类型:东南部城市聚集区,影响脆弱性的主导因素分别为建筑用地、初级生产力与土壤有机质,脆弱性主要体现为高频率居民活动所造成的影响;在晋江流域中西部,影响脆弱性的主导因素为茶叶的过度种植;其他区域脆弱性主导要素不明显,多种要素共同作用。

(3)为了改善晋江流域的脆弱性,建议在城市聚集区减缓土地的占用,植树造林增加植被覆盖以及土壤修复;在茶叶种植密集区,合理规划,适度科学种植,建议感德镇、金谷镇、长坑乡、金谷镇 4 个乡镇与剑斗镇南部不宜种植茶叶,进行茶叶种植调整优化;在一都镇、下洋镇、桂阳镇、以及蓝田乡适度扩展种植茶叶。

参考文献

- [1] 高杨. 晋江西流域环境变化的水文响应研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2009.
GAO Y. Hydrological response to environmental change in xixi watershed of Jinjiang river[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2009.
- [2] 陆海燕. 新疆生态脆弱性评价研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2020.
LU H Y. Study on ecological vulnerability assessment in xinjiang[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2020.
- [3] 任源鑫, 林青, 韩婷, 等. 陕西省水资源脆弱性评价[J]. 水土保持研究, 2020, 27 (2): 231-236.
REN Y X, LIN Q, HAN T, et al. Evaluation on the vulnerability of water resources in Shaanxi Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27 (2): 231-236.
- [4] 王贝贝, 丁明军, 管琪卉, 等. 基于格网的南昌市生态环境脆弱性评价[J]. 生态学报, 2019(15): 5460-5472.
WANG B B, DING M J, GUAN Q H, et al. Gridded assessment of eco-environmental vulnerability in Nanchang City [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019 (15): 5460-5472.
- [5] 张慧琳, 吴攀升, 侯艳军. 五台山地区生态脆弱性评价及其时空变化[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 3 (8): 1026-1035.
ZHANG H L, WU P S, HOU Y J. Ecological vulnerability assessment and its temporal and spatial changes in Wutai mountain area[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020, 3(8): 1026-1035.
- [6] 周玲美, 王世航, 权玲. 基于遥感和地理信息系统的内蒙古呼日查干淖尔地区生态脆弱性评价[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(4): 484-491.
ZHOU L M, WANG S H, QUAN L. Ecological vulnerability assessment in huri chagannoor of Inner Mongolia based on rs and gis technology[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021, 37(4): 484-491.
- [7] POLSKY C, NEFF R, YARNAL B. Building comparable global change vulnerability assessments: The vulnerability scoping diagram [J]. Global Environmental Change, 2007, 17(3-4): 472-485.
- [8] 黄炎, 陈国光, 李雪平. 武夷山茶茶叶品质与土壤地球化学背景特征关系探讨[J]. 华东地质, 2020, 41(2): 166-176.
HUANG Y, CHEN G G, LI X P. Discussion on the relationship between Wuyishan tea quality and geochemistry background characteristics [J]. East China Geology, 2020, 41(2): 166-176.
- [9] 李平星, 樊杰. 基于 VSD 模型的区域生态系统脆弱性评价——以广西西江经济带为例[J]. 自然资源学报, 2014, 5(29): 49-58.
LI P X, FAN J. Regional ecological vulnerability assessment based on vsd model: a case study of Xijiang river economic belt in Guangxi [J]. Journal of Natural Resources, 2014, 5(29): 49-58.
- [10] 尚嘉宁, 邵怀勇, 李峰, 等. 金沙江流域生态脆弱性评价[J]. 湖北农业科学, 2021, 60(8): 50-54.
SHANG J N, SHAO H Y, LI F, et al. Assessment of ecological vulnerability in Jinsha river basin[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2021, 60(8): 50-54.
- [11] 贾晶晶, 赵军, 王建邦, 等. 基于 SRP 模型的石羊河流域生态脆弱性评价[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34 (1): 36-43.
JIA J J, ZHAO J, WANG J B, et al. Ecological vulnerability assessment of Shiyang river basin based on SRP model[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34 (1): 36-43.
- [12] 泉州市水利局. 2018 福建省水资源公报[EB/OL]. (2019-07-30) [2021-08-09]. http://slj.quanzhou.gov.cn/zwgk/ghjh/201908/t20190822_1947845.htm.
Quanzhou Water Resources Bureau. 2018 Fujian Water Resources Bulletin[EB/OL]. (2019-07-30) [2021-08-09]. http://slj.quanzhou.gov.cn/zwgk/ghjh/201908/t20190822_1947845.htm.
- [13] NASA. New Version of the ASTER GDEM[EB/OL]. [EB/OL]. (2020-03-03) [2021-08-09]. <https://earthdata.nasa.gov/learn/articles/new-aster-gdem>.
- [14] 中国科学院南京土壤研究所. 中国土壤科学数据库[EB/OL]. (2019-03-17) [2021-08-09]. <http://vdb3.soil.csdb.cn/>.
Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. China Soil Science Database [EB/OL]. (2019-03-17) [2021-08-09]. <http://vdb3.soil.csdb.cn/>.
- [15] 戴永久, 上官微. 中国土壤有机质数据集[EB/OL]. (2018-07-23) [2021-08-09]. <https://geodata.pku.edu.cn/index.php?c=content&a=show&id=416>.
DAI Y J, SHANGGUAN W. Chinese soil organic matter data set [EB/OL]. (2018-07-23) [2021-08-09]. <https://geodata.pku.edu.cn/index.php?c=content&a=show&id=416>.
- [16] 北京大学城市与环境学院. 北京大学城市与环境学院地理数据平台[EB/OL] (2018-07-23) [2021-08-09]. <http://geodata.pku.edu.cn>.
College of Urban and Environmental Sciences. Geographic data platform, School of city and environment, Peking University [EB/OL]. (2018-07-23) [2021-08-09]. <http://geodata.pku.edu.cn>.
- [17] 李勇, 唐澈, 赵华, 等. 茶树耐铝聚铝特性及其机理研

- 究进展[J]. 茶叶科学, 2018, 38(1):1-8.
- LI Y, TANG C, ZHAO H, et al. Advances of aluminum tolerance and accumulation in tea plant [J]. Journal of Tea Science, 2018, 38(1):1-8.
- [18] ANSELIN L. Local Indicators of Spatial Association—LISA [J]. Geographical Analysis, 2010, 27 (2): 93-115.
- [19] 骆嘉伟, 李仁发, 张白妮. 基于多维伪 F 统计量的基因表达动态聚类分析方法研究[J]. 系统仿真学报, 2006(3):586-589.
- LUO J W, LI R F, ZHANG B N. Study on dynamic clustering analysis method for gene expression data based on multidimension pseudo f-statistics [J]. Journal of System Simulation, 2006(3):586-589.
- [20] 刘文博, 梁盛楠, 余泉, 等. 基于伪 F 统计量的属性特征降维方法研究[J]. 东北师大学报: 自然科学版, 2020(1):43-49.
- LIU W B, LIANG S N, YU Q, et al. Attribute feature dimensionality reduction method based on pseudo f statistic [J]. Journal of Northeast Normal University: Natural Science Edition, 2020(1):43-49.
- [21] CALINSKI T, HARABASZ J. A dendrite method for cluster analysis [J]. Communications in Statistics, 1974, 3(1): 1-27.
- [22] 文锡梅, 陆洋, 兰安军, 等. 无公害茶园地的空间分析及土地适宜性综合评价——以贵定县为例[J]. 中国农学通报, 2012, 28(2):265-272.
- WEN X M, LU Y, LAN A J, et al. Space analysis and land suitability comprehensive evaluation of pollution-free tea plantation—A case study of guiding county, guizhou province [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(2):265-272.
- [23] 杨高, 李颖, 付波霖, 等. 基于遥感的河岸带生态修复效应定量评估——以辽河干流为例. [J]. 水利学报, 2018, 49(5):608-618.
- YANG G, LI Y, FU B L, et al. Quantitative evaluation of riparian ecological restoration in Liao river based on remote sensing. [J]. Journal Of Hydraulic Engineering, 2018, 49(5):608-618.

Vulnerability assessment of ecological environment of Jinjiang River Basin

LI Jianfeng^{1,2}, ZHU Yuchen¹, LIU Chunlei¹, LI Yasong¹, HAO Qichen^{1,2}, LI Zhenghong²

(1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Shijiazhuang 050061, Hebei, China;

2. Key Laboratory of Groundwater Sciences and Engineering, Ministry of Natural Resources, CAGS, Shijiazhuang 050061, Hebei, China)

Abstract: In view of the increasingly prominent ecological geological problems in Jinjiang River Basin, it is urgent to strengthen the protection of ecological environment and carry out ecological environment vulnerability assessment, which can provide decision-making basis for ecological environment protection. The vulnerability assessment model of ecological environment system in Jinjiang River Basin is established. Using Getis-Ord G_i^* statistical model, Calinski-Harabasz index evaluation clustering model and other evaluation methods, vulnerability assessment is carried out from three aspects: vulnerability classification, main control factors and aggregation characteristics. The results show that in terms of vulnerability, Xixi is more vulnerable than Dongxi, and the upstream is more vulnerable than the downstream. In terms of main controlling factors, the main controlling factors of vulnerability in the southeast plain of Jinjiang River Basin are construction land, primary productivity and soil organic matter. The main controlling factor of vulnerability in Central and Western China is tea planting. In terms of aggregation characteristics, high vulnerability aggregation areas are Gande town of Anxi County and Huyang Town of Yongchun County. Based on the above analysis, the rationality of the current situation of tea plantation distribution in Jinjiang River Basin is evaluated, and specific suggestions for tea plantation spatial optimization are given.

Key words: Jinjiang River Basin; vulnerability assessment; cluster analysis; Getis-Ord G_i^* statistical model; Calinski-Harabasz index evaluation clustering model; optimization of tea planting