第 31 卷第 2 期 地 质 与 资 源 Vol. 31 No. 2
2022 年 4 月 GEOLOGY AND RESOURCES Apr. 2022
文章编号:1671-1947(2022)02-0193-08 中图分类号:P595;S159 开放科学标志码(OSID):
DOI: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2022.02.009 文献标志码:A

滇中武定高桥镇土地质量地球化学评价

徐 杰,向经纬,王浩宇
中国地质调查局 昆明自然资源综合调查中心,云南 昆明 650000

摘 要: 在武定县高桥镇以 1.12 个/km² 的密度共采集 453 件表层土壤样品. 对重金属元素砷、铬、镉、铜、汞、铅、镍和锌做土壤环境地球化学等级评价,最终评级为一等和二等. 一等区面积约 350 km²,占比 84.95%;二等区面积约 62 km²,占比 15.05%,部分地区铜和镉显示异常但未达到污染级别. 对养分元素氮、磷、钾含量值做土壤养分地球化学等级评价, 中等以上约 378 km², 占比 91.74%. 养分缺乏地块靠近人口密集区,推测该评价单元受人为因素影响严重. 最终得到土地质量地球化学评价结果,高桥镇土地质量相对均衡,优质区约 101 km²,占比 24.51%,良好区约 224 km²,占比 54.37%,中等区约 80 km²,占比 19.42%,无劣等区.
关键词: 土地质量;重金属;养分元素;地球化学;云南省

GEOCHEMICAL EVALUATION OF LAND QUALITY IN GAOQIAO TOWN, CENTRAL YUNNAN

XU jie, XIANG jing-wei, WANG hao-yu
Kunming Center of Natural Resources Comprehensive Survey, CGS, Kunming 650000, *China*

Abstract: A total of 453 topsoil samples are collected at a density of 1.12 cores per square kilometer in Gaoqiao Town of Wuding County. The heavy metal elements such as As, Cr, Cd, Cu, Hg, Pb, Ni and Zn are evaluated for soil environment geochemistry. The soil quality is assessed as first and second grades, with the first-grade area of 350 km², accounting for 84.95%, and the second-grade area of 62 km², making up 15.05%. Cu and Cd in some parts of the area show abnormal but do not reach pollution levels. The contents of nutrient elements such as N, P and K are evaluated for soil nutrient geochemical grading, with about 378 km² above medium level, occupying 91.74%. The nutrient-deficient parts are close to densely-populated area, therefore it is inferred that the evaluation unit is seriously affected by human activities. From the above, the land quality geochemical evaluation for Gaoqiao Town shows a relative balance, with high-quality area about 101 km², accounting for 24.51%, good area 224 km² (54.37%), medium area 80 km² (19.42%), and no inferior area.
Key words: land quality; heavy metal; nutrient element; geochemistry; Yunnan Province

0 引言

开展土地质量地球化学调查,并利用已有水文、地质、地球化学及生态学有关资料进行土地质量地球化学评价,是目前保障生态文明建设,发展绿色农业的重

收稿日期:2021-02-27;**修回日期:**2021-03-16. **编辑:**张哲.
基金项目:中国地质调查局"国土空间生态环境地质调查及修复"项目(编号 DD20208070).
作者简介:徐杰(1990—),男,硕士,工程师,主要从事地质资源勘查相关工作,通信地址 云南省昆明市西山区春雨路 1566 号,E-mail//821996790@qq.com

要手段[1]. 2020 年初,中国地质调查局新开“重点地区生态修复支撑调查”工程,“滇中楚雄地区土地质量地球化学调查”属于此工程下的二级项目,旨在查明高桥镇土壤有益元素、重金属元素分布特征,为该区后期土地利用规划、提高农业生产质量和实现精准扶贫提供科学依据.

1 研究区概况

高桥镇位于云南省武定县西部,距县政府驻地 40 km. 研究区内山区面积大,属于典型冷凉山区,蕴藏铜、铁、钛等矿产资源. 出露地层主要为寒武系、奥陶系下统、泥盆系、三叠系上统、侏罗系上统、白垩系上统和第四系,岩浆岩主要出露二叠纪峨眉山玄武岩和基性侵入岩脉[2]. 其中基性侵入岩脉主要分布于构造集中带上,第四系覆盖于盆地和地形宽缓开阔的坝区. 罗茨-易门断裂呈南北向穿过全境,其余断层大小不一,主体为北西和北东向两组(图 1).

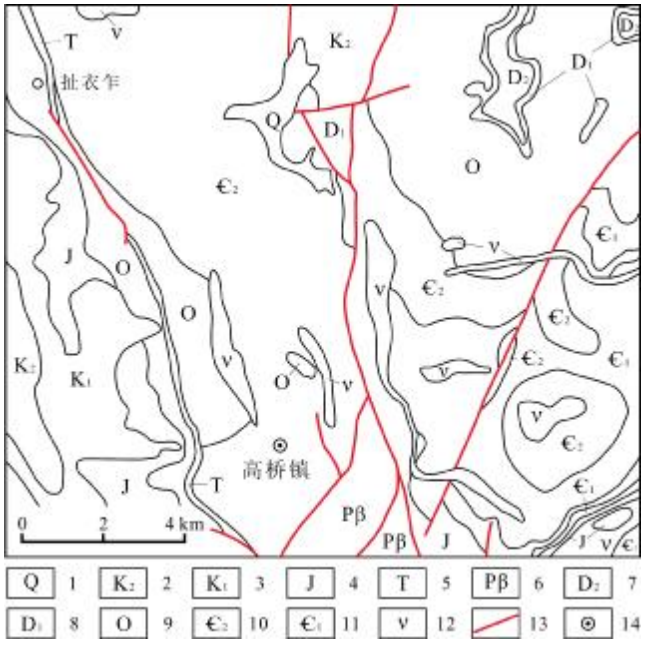

图 1 高桥镇地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of Gaoqiao Town

1—第四系(Quaternary);2—白垩系上统(Upper Cretaceous);3—白垩系下统(Lower Cretaceous);4—侏罗系(Jurassic);5—三叠系(Triassic);6—二叠系玄武岩(Permian basalt);7—泥盆系中统(Middle Devonian);8—泥盆系下统(Lower Devonian);9—奥陶系(Ordovician);10—寒武系中统(Middle Cambrian);11—寒武系下统(Lower Cambrian);12—基性侵入岩(basic intrusive rock);13—断层(fault);14—乡镇(township)

高桥镇主要土壤类型为紫色土,零星分布少量水稻土,西侧连片分布黄棕壤,东侧分布红壤(图 2). 土地利用类型以林地为主,各村周围小范围以旱地、水田为主要利用类型,零星分布少量草地(图 3).

图 2 高桥镇土壤类型图

Fig. 2 Map of soil types in Gaoqiao Town

1—水稻土(paddy soil);2—红壤(red soil);3—紫色土(purple soil);4—黄棕壤(yellow brown soil)

2 研究方法

运用传统地球化学手段,在高桥镇以 1.12 个/km^2 的密度进行表层土壤样品采集. 采样时选择具有代表性的地块,合理避开村庄、道路、工厂、垃圾堆放点、建筑用地及其他人为干扰较强的地方,确保采样质量. 取土壤 0~20 cm 连续土柱,用竹片削去采集污染面后放入样袋封存,样品原始重量大于 1000 g[3-5]. 共采集样品 453 件,在室温条件下自然风干后过 20 目尼龙筛,按 4 km^2 组合成一个分析样的原则,用四分法取 200 g 样品封存于聚乙烯瓶中送实验室分析,组合得到分析样品 97 件. 在四川省地质矿产勘查开发局成都综合岩矿测试中心进行样品分析,准确度采用土样监控分析测试的国家一级标准,精密度使用重复样法

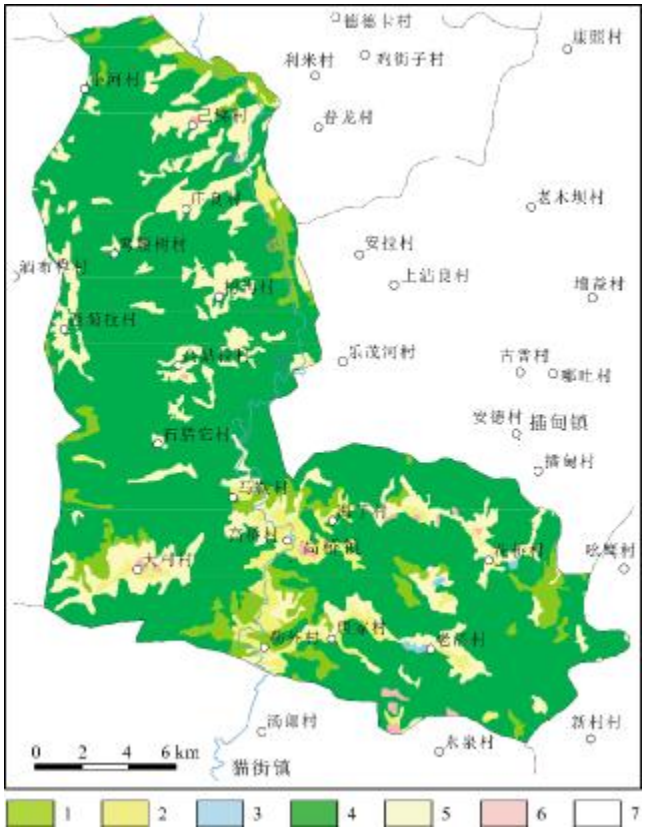

图 3　高桥镇土地利用类型图

Fig. 3　Map of land use types in Gaoqiao Town

1—草地(grassland)；2—水田(paddy land)；3—水域(water)；4—林地(forest)；5—旱地(dry land)；6—建筑用地(construction land)；7—其他(other land)

进行监测，标准物质合格率和重复样相对双差合格率均为 100%,数据准确可靠.

3　土地质量地球化学评价

评价方法参照《DZ/T0295—2016 土地质量地球化学评价规范》(以下简称“规范”),Cu、Zn 作为养分评价指标和环境评价指标，要求选择一种进行测试即可.本研究选择环境评价指标进行分析测试[6-7]. 对 4 km^2 内无样品测试数据的评价单元采用插值法进行赋值，通过插值误差计算，图斑内各元素的相对误差均小于 30%,满足评价要求.

3.1　土壤环境地球化学等级

遵循“短板法则”进行土壤环境质量地球化学等级划分，每个评价单元的土壤环境地球化学综合等级等同于单指标划分出的最差的环境等级[8]. 单指标分别为砷(As)、铬(Cr)、镉(Cd)、铜(Cu)、汞(Hg)、铅(Pb)、镍(Ni)、锌(Zn)等 8 种重金属元素,各元素主要参数特征如表 1 所示.

表 1　土壤重金属元素参数一览表

Table 1　Parameters of heavy metal elements in soil

元素	As	Cu	Cd	Cr	Pb	Ni	Zn	Hg
最大值	32.40	268.00	0.69	115.00	45.80	58.20	198.00	0.08
最小值	4.14	14.90	0.07	57.90	8.30	13.20	28.20	0.02
均值	8.62	36.46	0.19	86.49	27.36	33.94	75.40	0.03
中位数	7.72	30.20	0.18	87.00	26.80	32.60	75.50	0.03
众值	7.87	28.00	0.15	88.40	26.20	28.00	65.00	0.03
标准偏差	4.14	28.62	0.08	11.33	5.76	7.87	19.83	0.01
变异系数	0.48	0.78	0.43	0.13	0.21	0.23	0.26	0.38
云南省背景值	14.9	37.60	0.08	69.60	36.50	41.20	88.80	0.05

含量单位:10^{-6}.

元素单指标评价分为 3 个等级：一等为无风险($C_i \leqslant S_i$),二等为风险可控($S_i < C_i \leqslant G_i$),三等为风险较高($C_i > G_i$). C_i 指土壤中污染物指标 i 的实测质量分数；S_i 指土壤中污染物指标 i 在 GB15618 中给出的二级标准值；G_i 为各地区元素风险管控值. 单元素环境评级和占比情况详见表 2.

表 2　单元素环境评级情况统计表

Table 2　Statistics of single element environmental grading

评价等级	无风险(一等)		风险可控(二等)		风险较高(三等)	
	面积/km^2	占比/%	面积/km^2	占比/%	面积/km^2	占比/%
As	412	100.00	0	0.00	0	0.00
Cd	384	93.20	28	6.80	0	0.00
Cr	412	100.00	0	0.00	0	0.00
Cu	378	91.75	34	8.25	0	0.00
Hg	412	100.00	0	0.00	0	0.00
Ni	412	100.00	0	0.00	0	0.00
Pb	412	100.00	0	0.00	0	0.00
Zn	412	100.00	0	0.00	0	0.00
环境综合评价	350	84.95	62	15.05	0	0.00

评价结果显示,As、Cr、Hg、Ni、Pb 和 Zn 均为一等，占比 100%. Cd 一等区面积约 384 km^2，占比 93.2%；二等区面积约 28 km^2,占比 6.8%. 后者主要分布于高

桥镇西南、南部的灌木林地及有林地中，未见其他经济作物. Cu 一等区面积约 378 km²，占比 91.75%；二等区面积约 34 km²，占比约 8.25%，后者主要分布于高桥村、花桥村西北部的少量地块和边界地区的部分灌木林地中(图 4).

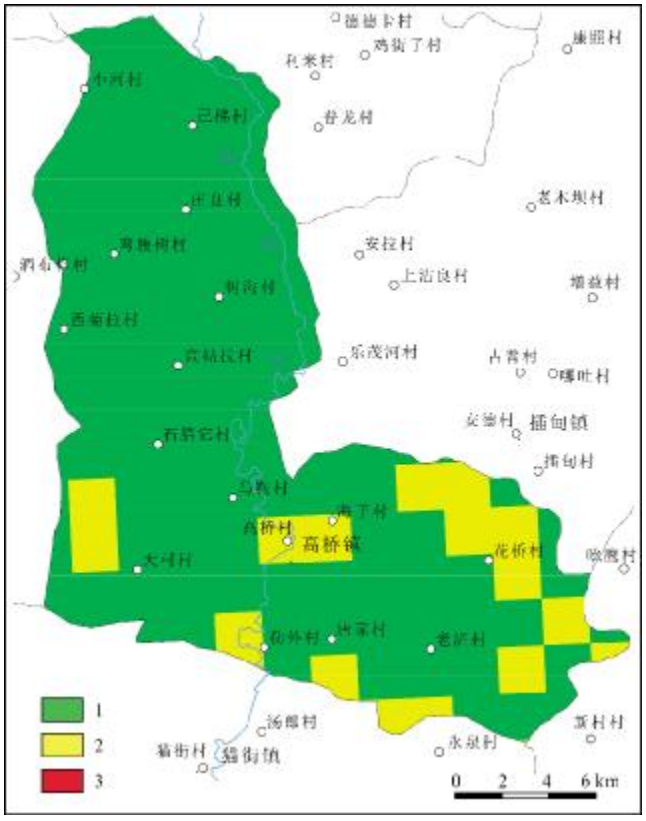

图 4 高桥镇土壤环境综合评价图

Fig. 4 Comprehensive evaluation map of soil environment in Gaoqiao Town

1—无风险(risk-free)；2—风险可控(risk-controllable)；3—风险较高(high risk)

土壤环境地球化学综合评价结果显示，整个高桥镇环境评级为一等和二等. 一等区面积约 350 km²，占比 84.95%；二等区面积约 62 km²，占比 15.05%，主要分布于高桥镇的高桥村、花桥村及工作区西部、南部、东南部灌木林地和有林地块中.

引起 Cd 轻微异常的原因或与农药施用不当有关，成土母岩中未见 Cd 含量偏高的层位. 高桥镇 Cu 资源丰富，侯林等[9]对县域铜矿床的研究表明，武定全域 Cu 成矿和异常背景一致，主要受构造和热液活动影响. 杨斌等[10]在后期对铜矿床的进一步研究中也佐证这一观点，在本次土地质量调查评价中，通过对成土物源和地质背景的综合分析，认为高桥镇局部土壤中的 Cu 值偏高，是由前期 Cu 矿化物质风化再沉积，加上地表流体、地下热液的持续作用所导致.

3.2 土壤养分地球化学等级

按规范标准，选择养分元素氮(N)、磷(P)、钾(K) 3 种元素含量值做土壤养分单指标评价. 各元素的主要参数特征如表3 所示.

表 3 土壤养分元素参数一览表

Table 3 Parameters of soil nutrient elements

元素	N	P	K
最大值	3118.00	1539.00	4.60
最小值	601.00	316.00	1.09
均值	1506.46	642.14	2.56
中位数	1454.00	599.00	2.54
众值	1611.00	529.00	2.45
标准偏差	389.73	177.34	0.54
变异系数	0.26	0.28	0.21

含量单位：10^{-6}.

首先进行单元素等级评价，土壤中养分的等级划分标准主要参照全国第二次土壤普查养分等级划分标准(6 等)[11]. 现将第五等与第六等标准进行合并，五等及五等以上的养分等级划分标准不变(表 4)：一等为丰富($f_{养综}$≥4.5)；二等为较丰富(<4.5~3.5)；三等为中等(<3.5~2.5)；四等为较缺乏(<2.5~1.5)；五等为缺乏(<1.5).

表 4 土壤中氮、磷、钾养分指标(全量)等级划分标准

Table 4 Grading standards of soil N, P and K nutrient indexes

指标	一等(丰富)	二等(较丰富)	三等(中等)	四等(较缺乏)	五等(缺乏)
N	>2	>1.5~2	>1~1.5	>0.75~1	≤0.75
P	>1	>0.8~1	>0.6~0.8	>0.4~0.6	≤0.4
K	>25	>20~25	>15~20	>10~15	≤10

含量单位：10^{-3}.

计算土壤养分地球化学综合得分，参照公式如下：

$$f_{养综}=\sum_{i=1}^{n} k_i f_i$$

式中，$f_{养综}$为土壤氮、磷、钾评价总得分，$1 \leqslant f_{养综} \leqslant 5$；$k_i$为氮、磷、钾权重系数，分别为 0.4、0.4 和 0.2；f_i为土壤氮、磷、钾的单元素等级得分，单指标评价结果为五等、四等、三等、二等、一等时所对应的f_i分别为 1 分、2 分、3 分、4 分、5 分.

土壤养分地球化学等级分为 5 等，同样遵循“短板法则”，等级与养分单元素划分方法相同. 单元素及综合评价结果详见表 5.

土壤养分地球化学综合评价结果显示：一等区面积约 5 km^2，占比 1.21%，分布于石腊它村西南约 2 km 的地块中；二等区约 125 km^2，占比 30.34%，除树沟村无覆盖外，在高桥镇其他区域零星分布；三等区约 248 km^2，占比约 60.19%，是养分评级中比重最大的部分，呈零星状分布，在西菊拉村、高姑拉村和树沟村相对集中；四等区约 28 km^2，占比 6.8%，主要分布于小河村以南、弯腰树村以北、石腊它村、高桥村以西、海子村东南部等地区；五等区约 6 km^2，占比 1.46%，分布于唐家村东北部(如图 5).

3.3　土壤质量地球化学综合等级

土壤质量地球化学综合等级由评价单元的土壤养分地球化学综合等级与土壤环境地球化学综合等级叠加产生，共划分为 5 个等级. 一等(优质)，表明土壤环境清洁，土壤养分丰富至较丰富；二等(良好)，表明土壤环境清洁，土壤养分中等；三等(中等)，表明土壤环境清洁且土壤养分较缺乏，或土壤环境轻微污染且土壤养分丰富至较缺乏；四等(差等)，表明土壤环境清洁

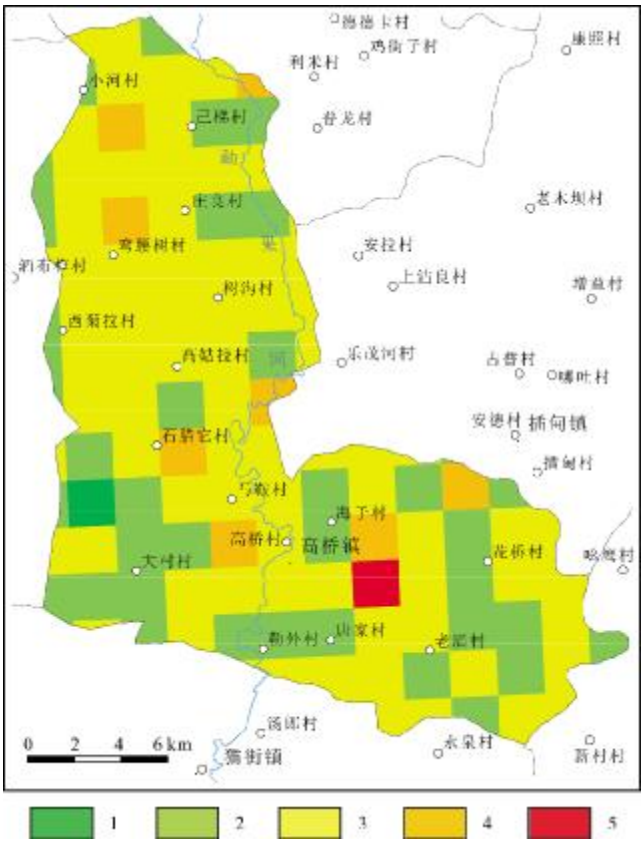

图 5　高桥镇土壤养分综合评价图

Fig. 5　Comprehensive evaluation map of soil nutrients in Gaoqiao Town

1—丰富(rich)；2—较丰富(relatively rich)；3—中等(medium)；4—较缺乏(relatively deficient)；5—缺乏(deficient)

表 5　单元素养分评级情况统计表

Table 5　Statistics of single element nutrient grading

等级	丰富(一等)		较丰富(二等)		中等(三等)		较缺乏 (四等)		缺乏(五等)	
	面积/km^2	占比/%	面积/km^2	占比/%	面积/km^2	占比/%	面积/km^2	占比/%	面积/km^2	占比/%
N	5	1.21	22	5.34	202	49.03	148	35.92	35	8.50
P	10	2.43	200	48.54	132	32.04	56	13.59	14	3.40
K	6	1.46	35	8.50	93	22.57	200	48.54	78	18.93
养分综合评价	5	1.21	125	30.34	248	60.19	28	6.80	6	1.46

表 6　高桥镇土壤质量地球化学综合等级评价结果

Table 6　Comprehensive geochemical evaluation results of soil quality in Gaoqiao Town

优质		良好		中等		差等		劣等	
面积/km^2	占比/%	面积/km^2	占比/%	面积/km^2	占比/%	面积/km^2	占比/%	面积/km^2	占比/%
101	24.51	224	54.37	80	19.42	7	1.70	0	0.00

或轻微污染且土壤养分缺乏，或土壤环境轻度污染且土壤养分丰富至缺乏或土壤盐渍化等级为强度；五等（劣等），表明土壤环境中度和重度污染且土壤养分丰富至缺乏，或土壤盐渍化等级为盐土. 高桥镇土壤质量地球化学综合等级评价结果（表 6）显示，优质区面积约 101 km^2，占比 24.51%，总体呈零星状分布，相对集中于高桥镇中部和东南部地区；良好区约 224 km^2，占比 54.37%，在高桥镇北部和西北部相对集中；中等区约 80 km^2，占比 19.42%，在高桥村、海子村和花桥村相对集中，其余地区呈零星分布；差等区约 7 km^2，占比 1.7%，分布于唐家村东北部；无劣等区（图 6）.

3.4 不同土地利用类型中土壤质量情况

通过对不同土地利用类型土壤质量各等级进行统计，并分别计算各土地利用类型占比情况（表 7），分析可得旱地中优质土壤占比最高，为 30.91%，其次为林地，优质土壤占比 25.70%. 水田中中等土壤占比最高，为 69.23%. 高桥镇主要土地利用类型为林地，其中 52.32%为良好质量土壤.

3.5 不同土壤类型中土壤质量情况

通过对不同土壤类型土壤质量各等级进行统计，并分别计算各土壤类型占比情况（表 8），分析可得黄棕壤中优质土壤占比最高，为 57.89%，其次为红壤，优质土壤占比 43.48%. 水稻土中中等土壤占比最高，为 50%. 高桥镇主要土壤类型为紫色土，其中 66.42%为良好质量土壤.

4 结语与建议

高桥镇土壤质量整体较好且分布均衡. 云南省重金属背景值相对较高，多地出现重金属污染[12-13]，由地质背景引起的异常具有覆盖面积大、持续作用力强的特点，后期改良也较为困难. 不同成土母质中 Cd 超标的风险顺序为：碳酸盐岩区>冲积物区>泥质岩区[14-15]，该区 Cu 和 Cd 均未达到污染级别，但在后期土地利用中应少施用重金属含量高的农药. 武定县的城镇区主

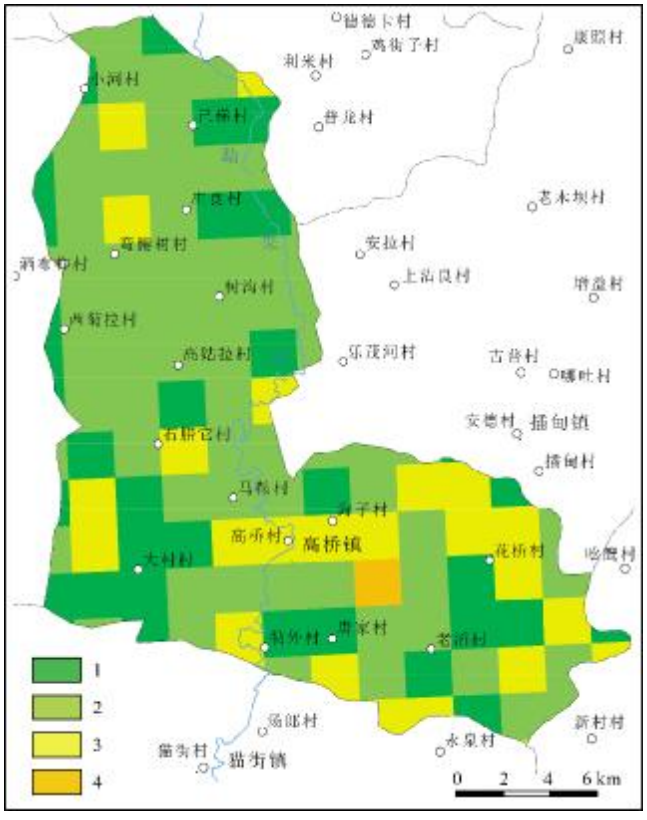

图 6 高桥镇土壤质量综合评价图

Fig. 6 Comprehensive evaluation map of soil quality in Gaoqiao Town

1—优质（high quality）；2—良好（good）；3—中等（medium）；4—差等（poor）

表 7 高桥镇不同土地利用类型土壤质量地球化学综合等级评价结果

Table 7 Comprehensive geochemical evaluation results of soil quality by land use types in Gaoqiao Town

土地利用类型	优质		良好		中等		差等		合计
	面积/km^2	占比/%	面积/km^2	占比/%	面积/km^2	占比/%	面积/km^2	占比/%	
草地			17	80.95	4	19.05			21
旱地	17	30.91	34	61.82	4	7.27			55
林地	83	25.70	169	52.32	67	20.74	4	1.24	323
水田			4	30.77	9	69.23			13
总计	100	24.27	224	54.37	84	20.39	4	0.97	412

表 8　高桥镇不同土壤类型土壤质量地球化学综合等级评价结果

Table 8　Comprehensive geochemical evaluation results of soil quality by soil types in Gaoqiao Town

土壤类型	优质		良好		中等		差等		合计
	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%	
红壤	30	43.48	17	24.64	22	31.88			69
黄棕壤	22	57.89	8	21.05	8	21.05			38
水稻土			17	50.00	17	50.00			34
紫色土	53	19.56	180	66.42	34	12.55	4	1.48	271
总计	105	25.49	222	53.88	81	19.66	4	1.03	412

要分布于县城周边和高桥镇[16-18],人口集中区土地质量评级不高，或与持续扩大的城镇化建设有关. 对于评级为差等的地块,应适当提高有机农肥的施用比率，降低农作物耕种频次，防止土壤质量进一步恶化. 这类土地单户种植成本偏高，可依据政府政策导向做好防护或集中改良. 该区属亚热带低纬度高原季风气候区,风化作用对土质影响较为明显[19-20],因此,土地治理具有长期性和周期性的特点.

参考文献(References):

[1]叶翠，肖卫东. 于都黄麟-祁禄山地区土地质量地球化学评价[J]. 江西煤炭科技，2020(1)：47-50.
Ye C，Xiao W D. Geochemical evaluation of land quality in Huanglin-Qilushan area of Yudu County[J]. Jiangxi Coal Science & Technology，2020(1)：47-50.

[2]张旭林，余长恒，王安平. 云南武定钛铁砂矿成因及控矿因素分析[J]. 四川地质学报，2018，38(3)：424-426，435.
Zhang X L，Yu C H，Wang A P. Genesis and ore control factors of Wuding ilmenite placer in Yunnan[J]. Acta Geologica Sichuan，2018，38(3)：424-426，435.

[3]中国地质调查局. 地球化学普查(比例尺：1:50 000)规范样品分析技术要求补充规定[S]. 北京：中国地质出版社，2007.
China Geological Survey. Supplementary provisions on technical requirements for sample analysis in geochemical reconnaissance specification (1:50 000)[S]. Beijing：Geological Publishing House，2007.(in Chinese)

[4]中华人民共和国国土资源部. DZ/T 0295—2016 土地质量地球化学评价规范[S]. 北京：中国标准出版社，2016.
Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. DZ/T 0295—2016 Determination of land quality geochemical evaluation[S]. Beijing：China Standards Press，2016.

[5]中华人民共和国国土资源部. DZ/T 0011—2015 地球化学普查规范(1:50 000)[S]. 北京：地质出版社，2015.
Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. DZ/T 0011—2015 Specification of geochemical reconnaissance survey (1:50 000)[S]. Beijing：Geological Publishing House，2015.

[6]汪实，朱鑫，黎旭荣，等. 广东雷州半岛土壤氮、磷、钾元素地球化学特征及其土壤肥力评价[J]. 中国地质，2021，48(4)：1177-1187.
Wang S，Zhu X，Li X R，et al. Geochemical characteristics of nitrogen，phosphorus and potassium and soil fertility evaluation in Leizhou Peninsula，Guangdong Province[J]. Geology in China，2021，48(4)：1177-1187.

[7]王娜，岳明新，马建生. 1:5 万地球化学普查中样品分析配套方案和质量监控体系[J]. 地质与资源，2015，24(1)：63-69.
Wang N，Yue M X，Ma J S. A Complete set of analytical scheme and quality control system of Chemical analysis for 1∶50 000 geochemical survey[J]. Geology and Resources，2015，24(1)：63-69.

[8]戴慧敏，赵君，刘国栋，等. 东北黑土地质量调查成果[J]. 地质与资源，2020，29(3)：299.
Dai H M，Zhao J，Liu G D，et al. Progress in the quality survey of black soil in Northeast China[J]. Geology and Resources，2020，29(3)：299.

[9]侯林，丁俊，王长明，等. 云南武定迤纳厂铁-铜-金-稀土矿床成矿流体与成矿作用[J]. 岩石学报，2013，29(4)：1187-1202.
Hou L，Ding J，Wang C M，et al. Ore-forming fluid and metallogenesis of the Yinachang Fe-Cu-Au-REE deposit，Wuding，Yunan Province，China[J]. Acta Petrologica Sinica，2013，29(4)：1187-1202.

[10]杨斌，侯林，郭阳，等. 云南武定地区核桃箐铁铜矿热液活动特征及其与迤纳厂铁铜矿的异同[J]. 矿物岩石，2019，39(4)：6-17.
Yang B，Hou L，Guo Y，et al. Characteristics of hydrothermal activity of the Hetaoqing iron-copper deposit in Wuding area and its similarity and difference with the Yinachang iron-copper

deposit in Yunnan Province[J]. Mineralogy and Petrology, 2019, 39(4): 6-17.

[11]秦先燕，彭苗枝，焦团理，等. 基于 GIS 的环巢湖地区地质环境承载能力评价[J]. 地质与资源，2020，29(2)：180-186.
Qin X Y, Peng M Z, Jiao T L, et al. Assessment of GIS-based geological environment carrying capacity in circum-Chaohu Lake area, Anhui, China[J]. Geology and Resources, 2020, 29(2): 180-186.

[12]秦元礼，张富贵，彭敏，等. 云南省武定县土壤重金属地球化学分布特征及其来源浅析[J]. 地质与勘探，2020，56(3)：540-550.
Qin Y L, Zhang F G, Peng M, et al. Geochemical distribution characteristics and sources of heavy metals in soils of Wuding County, Yunnan Province[J]. Geology and Exploration, 2020, 56(3): 540-550.

[13]中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京：中国环境科学出版社，1990：32-34.
China National Environmental Monitoring Centre. Chinese soil element background value [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990: 32-34.

[14]龚子同，黄标，欧阳洮. 我国土壤地球化学及其在农业生产中的意义[J]. 地理科学，1998，18(1)：6-14.
Gong Z T, Huang B, Ouyang T. Pedogeochemistry of china and its significance in agriculture[J]. Scientia Geographica Sinica, 1998, 18(1): 6-14.

[15]Paatero P, Tapper U. Positive matrix factorization: A non-negative factor model with optimal utilization of error estimates of data values[J]. Environmetrics, 1994, 5(2): 111-126.

[16]成晓梦. 云南不同成土母质土壤剖面中重金属元素地球化学行为与风险分析[D]. 北京：中国地质大学(北京)，2016.
Cheng X M. Geochemical behavior and risk analysis for heavy elements in soil profiles with different parent material, Yunnan Province, China[D]. Beijing: China University of Geosiciences (Beijing), 2016.

[17]于兵，吴克宁. 高背景值土壤重金属生态风险区划及防控[J]. 江西农业大学学报，2018，40(3)：629-634.
Yu B, Wu K N. Eco-risk regionalization and control of heavy metal in soil with high background value[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2018, 40(3): 629-634.

[18]赵其国. 提升对土壤认识，创新现代土壤学[J]. 土壤学报，2008，45(5)：771-777.
Zhao Q G. Improving knowledge of soil, innovating modern pedology[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 771-777.

[19]刘修通，周国强，马仁锋，等. 武定县地域功能区划分方法研究[J]. 宁波大学学报(理工版)，2015，28(1)：80-85.
Liu X T, Zhou G Q, Ma R F, et al. Case study: County-level function-based regionalization method[J]. Journal of Ningbo University (NSEE), 2015, 28(1): 80-85.

[20]赵思传，王亚伟，让昊，等. 滇中武定地区钛铁砂矿成矿地质条件[J]. 云南地质，2020，39(2)：260-266.
Zhao S C, Wang Y W, Rang H, et al. Metallogenic conditions of ilmenite placer in Wuding area, central Yunnan[J]. Yunnan Geology, 2020, 39(2): 260-266.