

杨桂花,潘晓东,袁建飞,等.黔西北裸露岩溶地区水文地球化学特征对土地利用方式的响应研究[J].中国岩溶,2018,37(4):535-544.
DOI:10.11932/karst20180407

黔西北裸露岩溶地区水文地球化学特征 对土地利用方式的响应研究

杨桂花¹,潘晓东^{2,3},袁建飞¹,邓国仕¹,唐业旗¹

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心,成都 610081;

2. 中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室,广西 桂林 541004;

3. 联合国教科文组织国际岩溶研究中心,广西 桂林 541004)

摘 要:为了探讨不同土地利用方式下的水文地球化学特征与地下水循环演化的关系,文章选取贵州省毕节市典型农业区的农田、林地、草地灌木和建筑用地等四类土地利用方式,通过区域地质调查、遥感解译、水化学分析和图解方法,研究裸露岩溶地区其对地下水水化学组分的影响。结果表明:这四类土地利用区域地下水主要组分的浓度和主要矿物的饱和指数都呈差异性。此外,土壤易溶盐组分也随土地利用类型发生改变。并且发现,绝大多数样品中,土壤易溶盐组分浓度高于地下水中相同的组分。因此,降雨入渗补给条件下淋滤作用可导致土壤中易溶盐组分进入地下水中,进而影响地下水水化学组分浓度的演化趋势。研究区域地下水均以 HCO_3^- -Ca 型, HCO_3^- -Ca-Mg 型和 HCO_3^- - SO_4^{2-} -Ca 型水为主,但是,受自然地理因素和人类活动的影响,地下水组分和水化学类型在不同土地利用类型区域中存在差异性。基于本研究建立了地下水演化的两种概念模型。

关键词:岩溶地区;土地利用;地下水;水化学特征;人类活动

中图分类号:P641.3

文献标识码:A

文章编号:1001-4810(2018)04-0535-10

0 引 言

长期以来,对岩溶水生态系统的研究主要集中在岩溶地质条件、发育特征、地貌等方面^[1-9],部分城镇或集中供水区域也开展了相关岩溶地下水水质评价、水化学组分来源、迁移、转化等水文地球化学的研究工作^[10-15]。这些研究侧重于自然因素(地理条件、地层岩性和地质构造等)对岩溶水生态系统的影响,而人类活动对其影响的研究程度偏弱。近年来,越来越多的学者关注土地利用方式对岩溶地区地下水生态环境的影响,使之逐渐成为岩溶水文地质学研究的热点之一^[16-25],这是因为土地利用方式能够显著地反映人类活动对岩溶地下水水文地球化学的影响^[16, 18, 21, 26-29]。

本文以贵州省毕节市海子街镇及其邻区为例,通过区域地质调查、遥感解译、水化学分析和图解等方法或手段,研究土地利用方式对地下水水化学的影响,相关成果对区域地下水资源开发利用和水质保护具有一定的指导意义。

1 研究区概况

1.1 自然地理

研究区位于贵州省西北部,隶属毕节市七星关辖区,主要涉及乡镇包括海子街镇、对坡镇、何官屯镇、田坝桥镇、层台镇和八寨镇。区内地势由北向南,由西向东缓缓降低,高程 1 400~2 000 m,相对高差 100~500 m。地貌以丘陵盆地、峰林谷地、峰林洼

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(12120113052500、DD20160285);国家自然科学基金项目(41502245)

第一作者简介:杨桂花(1980-),女,工程师,主要从事水文地质环境地质方面的研究。E-mail:47079414@qq.com。

通信作者:袁建飞(1983-),男,博士,高级工程师,主要从事水文地球化学和地热地质的研究。E-mail:jianfeiyuan@163.com。

收稿日期:2017-10-20

地、峰丛洼地,峰丛槽(狭)谷等裸露岩溶地貌为主,其发育和展布特征受北北东向和北东向断裂构造和地层岩性控制^[30]。区内出露地层为:寒武系、奥陶系、石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系和第四系,其主要岩性为灰岩、白云岩、石英砂岩、粉砂岩和泥岩,少数地层夹有石膏、煤线和黄铁矿。

研究区属暖温带季风湿润气候,年均气温 11.8℃,年均降雨量 841.3 mm,主要集中于 5—9 月。区内地表水系较为发育,以中部大水沟梁子为分水岭,北部河流属赤水河水系,南部河流属乌江水系^[30]。

1.2 地下水系统特征

根据地层岩性和地下水赋存介质特征,将地下水划分为碳酸盐岩类岩溶水、基岩裂隙水和第四系孔隙

水(表 1)。碳酸盐岩类岩溶水分布广泛,其赋存于碳酸盐岩裂隙及溶洞中,泉水流量为 0.01~300.00 L·s⁻¹;基岩裂隙水主要出露于海子街镇和八寨镇东部地区,泉流量为 0.01~1.42 L·s⁻¹;第四系孔隙水主要分布于研究区南部河流阶地和冲积物堆积区,泉流量一般小于 1 L·s⁻¹。邓国仕等^[30]结合研究区地形地貌、地表水系分水岭、地下河发育特征划分为三个主要的、相对完整的岩溶水系统,分别是地下河系统、岩溶大泉系统、岩溶泉及分散流系统。区内地下水均以大气降水补给为主,受地形、地貌影响,研究区地下水以浅循环、快速潜流为主,分别向南、北方向形成地下径流,再以泉或泉群于河谷地带或斜坡坡脚处出露,呈“线状”排泄于区内河流和溪沟。

表 1 研究区含水岩组简表
Table 1 Water-bearing rocks in the study area

含水类型	含水岩组地层	富水性级别	泉流量范围/L·s ⁻¹
碳酸盐岩类岩溶水	石炭系、二叠系和三叠系	丰富	0.10~300.00
	奥陶系、寒武系和三叠系	中等	0.03~30.00
	奥陶系、二叠系和三叠系	贫乏	0.01~2.20
基岩裂隙水	奥陶系、二叠系和三叠系	贫乏	0.01~1.42
松散岩类孔隙水	第四系松散沉积物	贫乏	0.02~0.10

1.3 人类活动

本区主导产业为农业,粮食作物以玉米、小麦和水稻为主;经济类作物为烤烟和油菜,烤烟为区内最重要的经济作物。研究区耕地多临近地表河系和岩溶大泉出露区,当地居民使用动物粪肥和人工化合氮肥为农作物施肥,且普遍使用农药除草和杀虫。此外,研究区村落亦傍河依水而居,当地居民多养殖鸡、鸭和猪、羊等禽畜,居民生活废水和动物粪便直接排入河水或溪沟中^[10]。

区内矿产资源较丰富,尤以煤炭为主,但多为私采,采矿点主要分布于研究区西部和东北部的何官屯镇和层台镇一带,已废弃的煤矿废井附近地表溪沟呈褐黄色^[30]。

2 研究方法

2.1 土地利用方式的遥感解译

遥感解译采用了德国 Rapideye 数据,该数据为预正射产品(Ortho Ready Standard),带有 RPC(Rational Ploynomial Coefficient,有理多项式系数)参数,分辨率为 5 m,获取时间为 2011 年冬季,数据无云、无雪,色彩对比度高,影像清晰,数据质量好。由于获得的 Rapideye 数据为预正射产品,采用有理函

数模型(Rational Function)对 Rapideye 原始影像进行正射校正,即在 PCI 遥感图像处理软件中采用 Rapideye 单景影像+RPC+DEM+GCP 的模式,对 Rapideye 原始全色影像进行正射校正。校正后的遥感数据采用 ENVI 软件进行土地利用方式的自动分类和人工屏幕交互判别,并通过野外地质调查进一步核对,最终划分为水体、石漠化土地、建筑用地、草地灌木地、林地和农田 6 个类型(图 1)^[30]。

2.2 样品采集

笔者于 2013 年 10 月对研究区地下水开展了系统的采样工作,采样点位置见图 2。采样瓶为 350 mL 乙酸泡洗干净的聚乙烯塑料瓶。采样时,先用水样润洗采样瓶 3 次,再将取样瓶放入水中装满,并水下盖紧瓶盖。所有水样当日用 0.45 μm 的微孔滤膜进行抽虑,并分成两份:一份不添加任何试剂用于阴离子测试,另一份加入优级纯硝酸至 pH 值小于 2 用于阳离子测试。处理后的水样蜡封并低温保存(4℃),待测。

此外,在水样采集的同时,结合研究区主要土地利用方式(建筑用地、草地、林地和农田),选择性地采集土壤样品 25 组,样品采集深度在 0~20 cm,采样点位置见图 2。

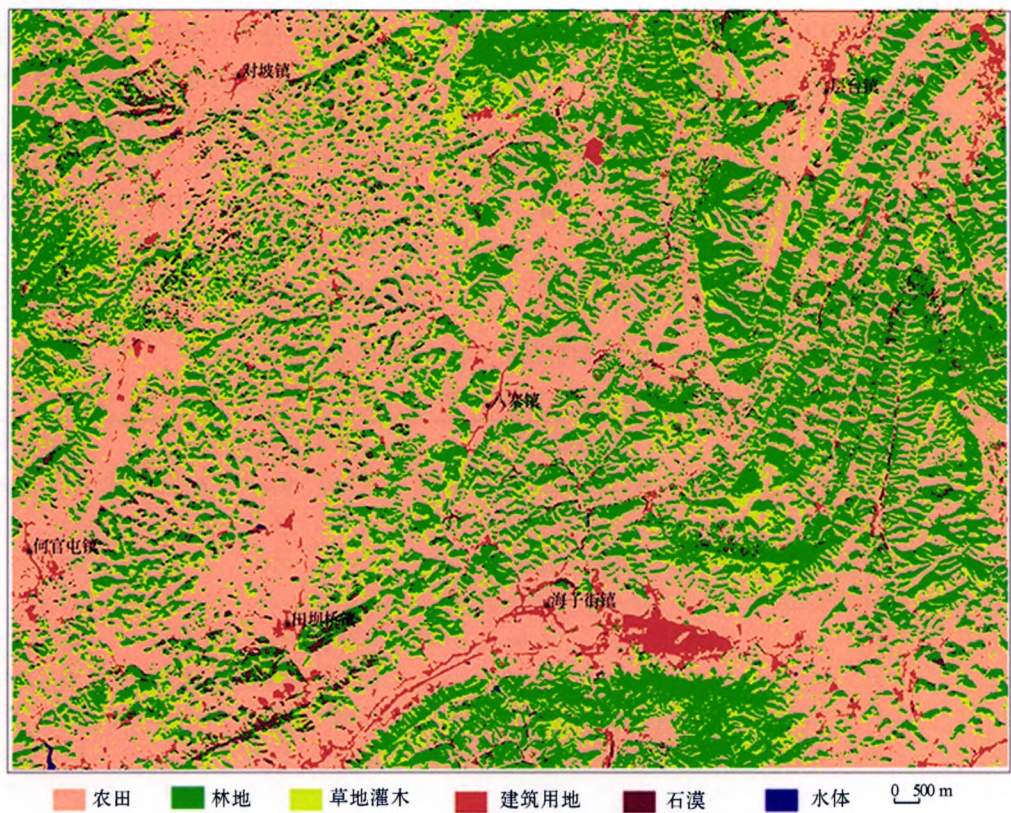


图 1 研究区土地利用方式的遥感分类图

Fig. 1 Remote sensing-based classification of land uses in the study area

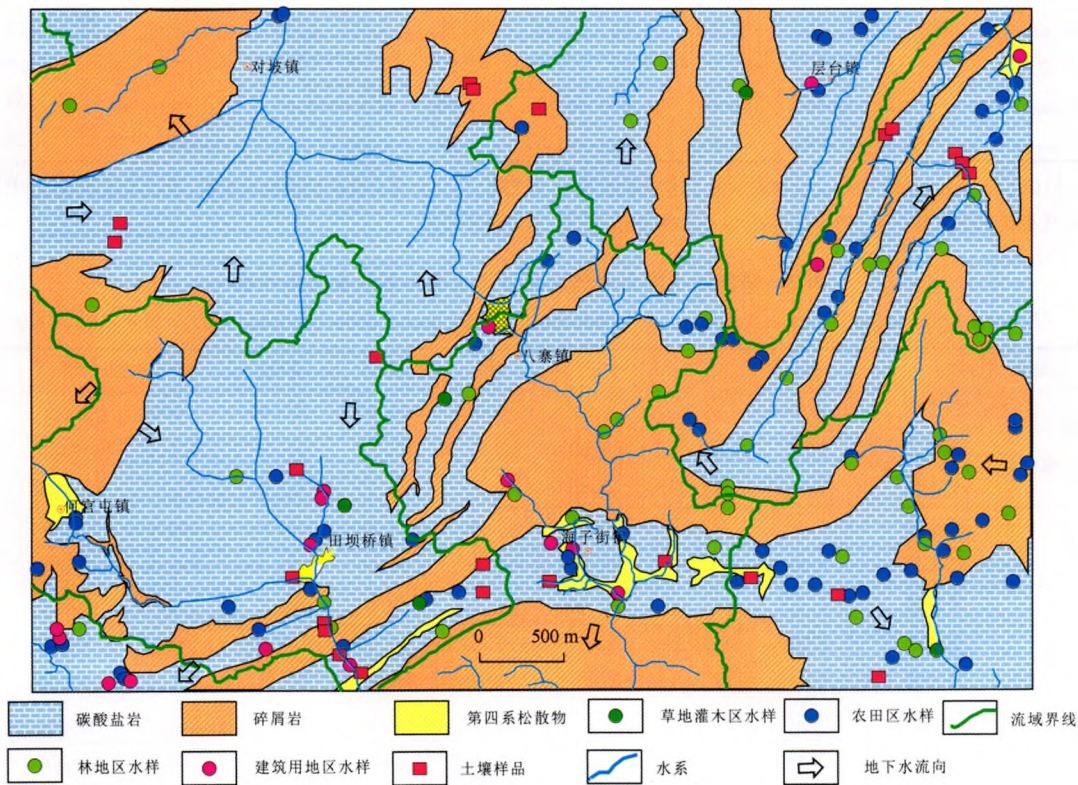


图 2 研究区地质简图和采样点分布图

Fig. 2 Geological sketch map and sampling locations of the study area

2.3 测试和分析方法

水样采集时,现场采用已校正好的便携式水质分析仪测定水温(T)、pH、总溶解性固体(TDS)指标,碱度指标于当天采用 0.05 mol·L⁻¹的盐酸滴定。其他指标于水样采集后 2 周内在具有国家计量资质证书的贵州黔北建筑实验测试有限公司测定。所有测试水样阴阳离子电荷平衡误差均在 5%以内。

土壤样品进行了水溶盐测试,测试方法参照对应

的国家标准和部门标准,所有样品在具有国家计量资质证书的四川省地质工程勘察院环境工程中心测定。

此外,结合研究区主要地层岩性及矿物组成特征,采用水化学软件 PHREEQC 3.1.7 程序计算了所采集水样的碳酸钙、白云石、二氧化碳和石膏的饱和指数,用于分析水岩作用过程中地下水与主要矿物组分的平衡关系。

测试结果见表 2 和表 3。

表 2 研究区不同土地利用条件下地下水物理化学参数统计表

Table 2 Statistics of physicochemical parameters of groundwater under different land uses in the study area

项目	农田(N=79)			林地(N=52)			建筑用地(N=22)			草地灌木(N=6)		
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
T/℃	12.50	28.30	15.01	13.20	28.40	15.38	13.20	19.10	15.43	14.10	16.50	15.23
pH	6.40	8.00	7.33	6.90	8.00	7.37	6.70	7.80	7.43	6.70	7.50	7.27
K ⁺ /mg·L ⁻¹	0.30	14.90	1.48	0.20	24.70	2.12	0.40	4.50	1.38	1.10	3.20	1.83
Na ⁺ /mg·L ⁻¹	0.60	35.50	3.01	0.60	16.00	2.97	0.50	7.20	2.12	1.00	6.10	2.77
Ca ²⁺ /mg·L ⁻¹	9.48	225.88	73.69	11.21	232.77	73.41	23.28	448.30	90.72	37.93	106.90	73.06
Mg ²⁺ /mg·L ⁻¹	1.05	51.76	12.44	2.09	60.64	15.95	2.61	38.16	14.38	6.80	38.16	19.17
Cl ⁻ /mg·L ⁻¹	0.95	21.28	5.74	1.89	32.16	6.41	1.89	21.75	6.23	4.73	17.97	7.72
SO ₄ ²⁻ /mg·L ⁻¹	10.00	570.00	68.62	11.00	580.00	66.75	8.00	920.00	97.41	26.00	132.00	55.73
HCO ₃ ⁻ /mg·L ⁻¹	9.94	352.94	183.55	4.97	432.48	193.78	64.62	328.09	204.94	79.54	323.12	214.59
NO ₃ ⁻ /mg·L ⁻¹	0.60	54.00	17.12	0.60	104.00	25.67	0.60	48.00	16.71	14.00	56.00	31.83
TH/mg·L ⁻¹	34.42	777.16	235.24	51.67	787.93	248.98	73.20	1162.47	285.74	133.46	424.06	261.37
TDS/mg·L ⁻¹	67.61	1087.21	342.98	86.62	1018.30	356.89	132.24	1519.78	393.49	231.38	636.01	368.79
SI _{Calcite}	-2.39	0.54	-0.24	-2.89	0.58	-0.20	-1.03	0.64	-0.04	-1.38	0.15	-0.23
p(CO ₂)	-3.14	-1.57	-2.18	-3.26	-1.55	-2.22	-2.68	-1.47	-2.22	-2.43	-1.85	-2.06
SI _{Dolomite}	-5.11	0.69	-1.18	-5.87	0.69	-0.98	-2.63	0.85	-0.71	-3.13	0.06	-0.91
SI _{Gypsum}	-2.71	-0.61	-1.85	-2.61	-0.59	-1.88	-2.97	-0.22	-1.86	-2.33	-1.39	-1.92

注:SI_{Calcite}、p(CO₂)、SI_{Dolomite}和 SI_{Gypsum}分别表示地下水中碳酸钙、二氧化碳、白云石和石膏矿物的饱和指数,通过水化学软件 PHREEQC 计算获取;N 代表地下水样品个数;TH:总硬度,以 CaCO₃表示;TDS:总溶解性固体。

表 3 研究区不同土地利用条件下土壤水溶盐参数统计表

Table 3 Statistics of water-soluble salt parameters of soil under different land uses in the study area

土地利用方式		pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻
农田 (N=13 组)	最小值	5.63	10.02	3.04	7.50	24.00	17.90	0.00	10.60	122.00
	最大值	7.15	441.9	47.42	52.00	35.00	56.90	170.00	18.80	503.40
	平均值	6.50	172.85	23.83	16.70	29.85	32.29	71.00	14.42	274.26
林地 (N=7 组)	最小值	5.45	98.20	12.16	11.00	24.00	15.10	0.00	8.51	152.50
	最大值	6.64	408.80	25.54	52.00	42.00	125.10	195.00	17.70	427.10
	平均值	6.12	232.12	17.94	27.92	30.83	52.57	95.00	13.57	299.47
建筑用地 (N=4 组)	最小值	6.62	120.20	9.12	11.50	53.00	114.00	200.00	16.30	213.60
	最大值	6.72	320.60	24.32	28.00	65.00	115.30	470.00	37.90	793.20
	平均值	6.67	220.40	16.72	19.75	59.00	114.65	335.00	27.10	503.40
草地灌木 (N=1 组)	最小值	6.44	180.40	6.08	11.00	35.00	72.20	155.00	25.20	274.60
	最大值	6.44	180.40	6.08	11.00	35.00	72.20	155.00	25.20	274.60
	平均值	6.44	180.40	6.08	11.00	35.00	72.20	155.00	25.20	274.60

注:N 代表样品个数;pH 无量纲,其他为 mg·kg⁻¹。

3 结果及讨论

3.1 研究区不同土地类型面积及占比

表 4 为研究区不同土地利用方式面积统计。区

内农田主要为旱地和坡耕地,分布广泛,坡度起伏大,占总面积的 52.88%;林地和草地灌木区所占面积分别为 31.59% 和 10.78%。建筑用地大多分布于稍开阔平缓的沟谷地区,为村庄、城镇和采矿区域。

表 4 研究区土地利用方式的面积统计

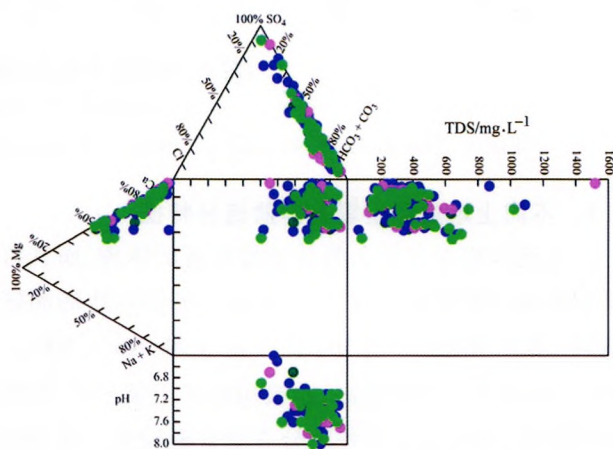
Table 4 Area statistics of different land-use modes in the study area

	水体	建筑用地	石漠化	农田	草地灌木	林地	合计
面积/km ²	0.15	13.95	7.58	241.46	49.22	144.23	456.60
比重/%	0.03	3.05	1.66	52.88	10.78	31.59	100

3.2 不同土地类型地下水组分特征

本研究对区内农田、林地、草地灌木和建筑用地等主要土地利用区采集地下水样品,并测试水样中主要离子组分和矿物饱和指数(表 2)。从表 2 得出:农田、林地、草地灌木和建筑用地区域地下水温度(T)和 pH 值均值相近,均为低温弱碱性水,其 TH 和 TDS 含量均值也相近,表明研究区地下水为浅循环的潜水,地下水流动速度较快,径流途径较短。四类土地利用区内地下水阳离子主要为 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} ,其含量分别介于 $9.48 \sim 225.88 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1.05 \sim 51.76 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $11.21 \sim 232.77 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $2.09 \sim 60.64 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $23.28 \sim 448.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $2.61 \sim 38.16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $37.93 \sim 106.90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $6.80 \sim 38.16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间;阴离子以 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 为主,其含量分别为 $9.94 \sim 352.94 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $10.00 \sim 570.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $4.97 \sim 432.48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $11.00 \sim 580.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $64.62 \sim 328.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $8.00 \sim 920.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $79.54 \sim 323.12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $26.00 \sim 132.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (图 3 和表 3)。其中,农田区地下水水化学类型主要为 HCO_3-Ca 型, $\text{HCO}_3-\text{Ca}-\text{Mg}$ 型和 $\text{HCO}_3-\text{SO}_4-\text{Ca}$ 型;林地区地下水水化学类型主要为 HCO_3-Ca 型, $\text{HCO}_3-\text{Ca}-\text{Mg}$ 型和 $\text{HCO}_3-\text{SO}_4-\text{Ca}$ 型;草地灌木区地下水类型主要为 $\text{HCO}_3-\text{Ca}-\text{Mg}$ 型和 $\text{HCO}_3-\text{SO}_4-\text{Ca}-\text{Mg}$ 型;建筑用地区水化学类型主要为 HCO_3-Ca 型, $\text{HCO}_3-\text{Ca}-\text{Mg}$ 型和 $\text{HCO}_3-\text{SO}_4-\text{Ca}$ 型(表 5)。除草地灌木区外,农田、林地和建筑用地区域地下水水化学类型相似,且与区域地质条件、水文地质条件和人类活动密切相关。此外,四类土地利用类型区域地下水中 NO_3^- 浓度变化范围较大,如林地区域地下水中 NO_3^- 浓度为 $0.60 \sim 104.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,

部分水样中 NO_3^- 浓度已超过国家生活饮用水标准,说明人类活动(粪肥和化肥使用、生活废水排放)对研究区地下水造成了污染^[10]。



(●: 草地灌木; ●: 农田; ●: 建筑用地; ●: 林地)

图 3 研究区不同土地类型地下水 Durov 图

Fig. 3 Durov diagram of groundwater samples under different land uses in the study area

由图 4 可知:四类土地利用方式地下水常规组分和主要矿物饱和指数呈现出差异性,具体体现在:①农田区和林地区地下水 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 、 HCO_3^- 、 NO_3^- 、碳酸钙饱和指数和白云石饱和指数变化幅度较其他土地利用方式大;②草地灌木区地下水 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 和 NO_3^- 均值含量相对于其他土地利用方式水样高;③建筑用地区域地下水中 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、TDS 值和石膏饱和指数变化范围则是四类土地利用方式中最大的,这主要受自然地理因素(如土壤物化性质)和人类活动(生活污水、作物施肥、采煤活动等)的影响^[11]。

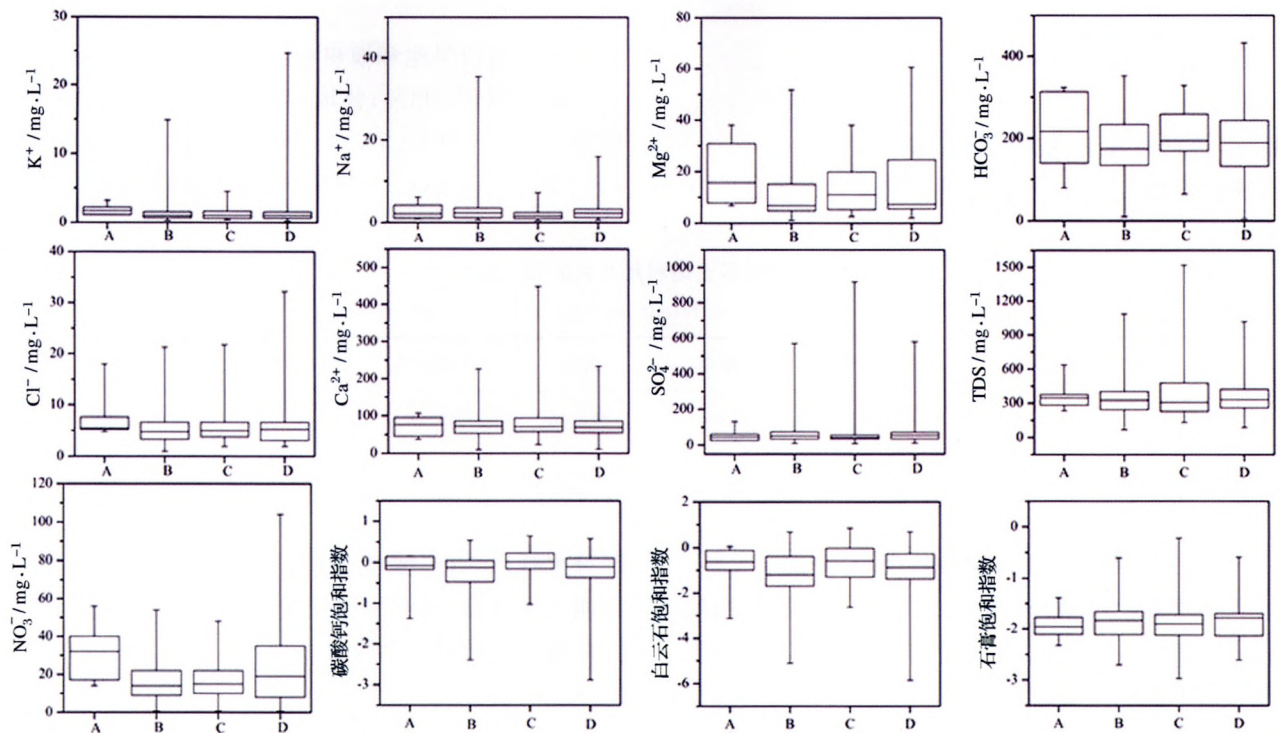


图4 研究区不同土地类型地下水样化学参数箱形图

A—草地灌木 B—农田 C—建筑用地 D—林地

Fig. 4 Box plots of chemical parameters of groundwater samples under different land uses in the study area

3.3 不同土地类型土壤易溶盐组分特征

土地利用方式是人类活动最直接的体现,而其首要的影响对象就是土壤^[16]。通过土壤易溶盐的测试结果(表3和图5)可知:农田区土壤 Na^+ 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 含量最高;建筑用地区土壤 Ca^{2+} 浓度相对较高;而林地土壤各组分含量普遍较低。造成土壤中上述组分差异的主要原因是农业粪肥和化肥施用、土地翻垦活动和建筑作业等人类活动。

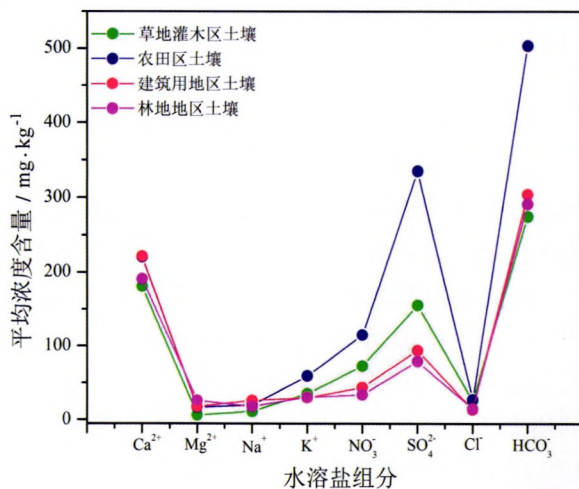


图5 研究区不同土地类型土壤易溶盐组分含量分布图

Fig. 5 Distribution of average concentrations of water-soluble salt of soil for different land uses in the study area

3.4 不同土地类型地下水和土壤主要化学组分的相互关系

地下水自补给区到排泄区,补给来源、渗透介质和径流方式等是影响地下水化学组分的基础因素。研究区地下水的补给来源包括:大气降水、生活污水、采煤尾矿废水、河水、灌溉入渗水和地下水侧向径流,这些补给水源首先淋滤土壤组分,发生主组分的溶解和沉淀作用。通过地下水常规组分与土壤易溶盐组分的关系图(图6)可知:

(1)土壤易溶盐组分 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 NO_3^- , HCO_3^- 和 Mg^{2+} , K^+ 和 Ca^{2+} 三者分别呈现相似的趋势,说明不同土地类型的土壤中这些组分化学性质相似。

(2)绝大多数样品中,土壤易溶盐组分浓度高于地下水。

土壤易溶盐组分浓度与区域背景值和人类活动相关^[16],通常情况下,降雨入渗淋滤土壤,携带易溶组分进入地下水,改变地下水中相应组分的浓度特征。这个过程受时间尺度和地下水运动方式影响,但土壤淋滤作用势必影响地下水组分的演化趋势,部分学者已经对此做了详细的研究^[18,20]。此外,本研究也发现少部分样品中,地下水组分高于土壤易溶盐(如草地灌木区域地下水中的 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 浓度高

于土壤易溶盐),推测可能与含水层岩性有关。当地下水在含水层中运动时,含水层岩性将进一步影响地下水组分信息。从野外地质调查和矿物组分鉴定结果可知,研究区岩石类型包括碳酸盐岩和硅酸盐,少数地层含有蒸发岩矿物(石膏和岩盐)^[30]。区内地下水溶质组分主要受碳酸盐岩矿物溶解的影响^[10](图 7)。

(3) 农田和林地区域土壤易溶盐组分 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 和 NO_3^- 浓度较其他土地利用类型土壤组

分低,而草地灌木和建筑用地区域土壤易溶盐 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 和 NO_3^- 组分浓度却较其他土地利用类型高。这主要是由于农田和林地区域土壤松软(受人类翻垦影响),补给水源易于下渗,淋滤土壤带走这些组分;而草地灌木和建筑用地区域,受放牧活动(地面板结)和人类活动(筑房、修路和采煤活动等)影响,地面渗水性差,补给水源难入渗淋滤土壤,导致土壤上述组分保持较高浓度。

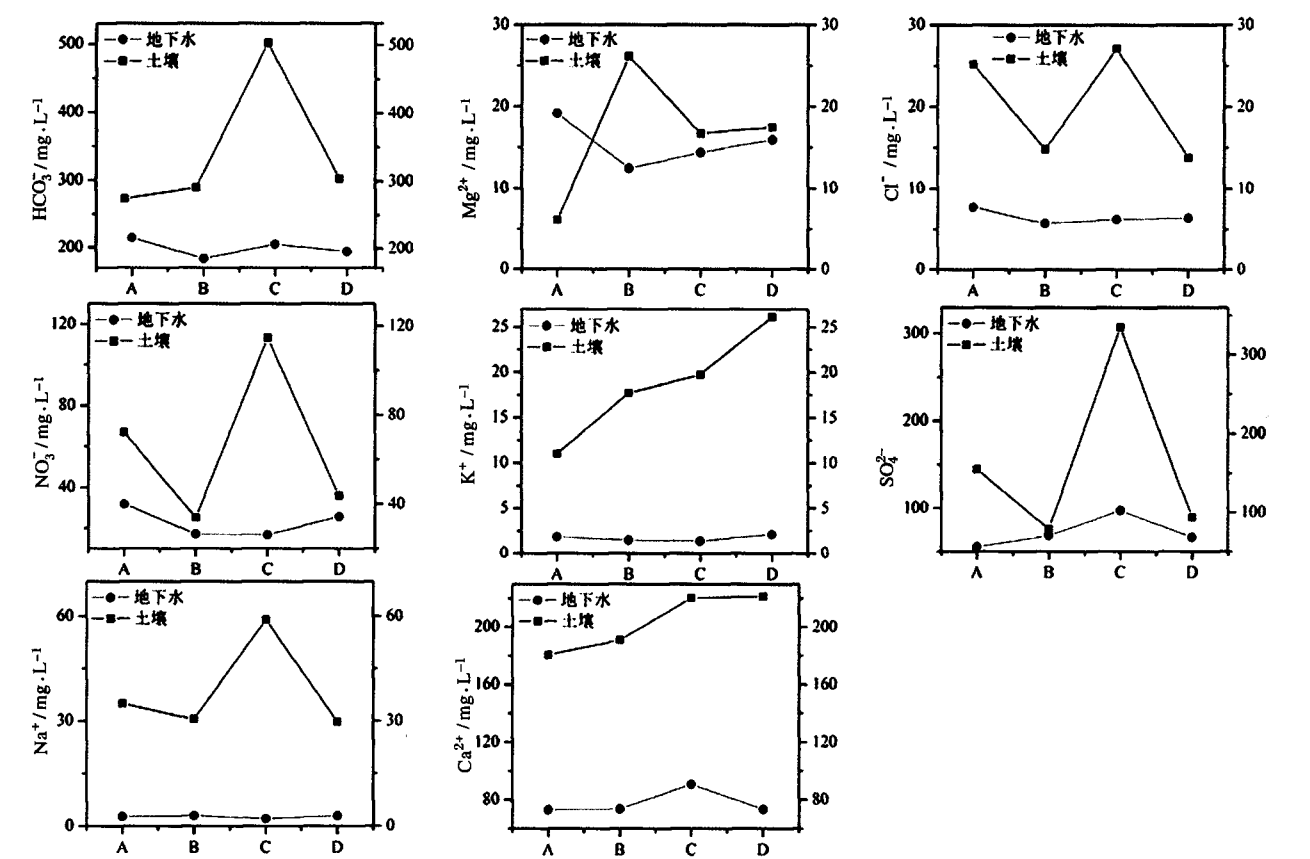


图 6 研究区地下水和土壤样品水化学主组分关系图

A—草地灌木 B—农田 C—建筑用地 D—林地

Fig. 6 Relationships of major compositions between groundwater and soil samples in the study area

表 5 不同类型土地利用条件下地下水水化学类型及影响因素

Table 5 Impacting factors and hydrochemical types of groundwater under different land uses

土地利用类型	地下水水化学类型	影响因素
草地灌木	HCO_3-Ca , $\text{HCO}_3-\text{Ca}-\text{Mg}$, $\text{HCO}_3-\text{SO}_4-\text{Ca}$ 和 $\text{HCO}_3-\text{SO}_4-\text{Ca}-\text{Mg}$	放牧活动,土壤性质和水岩作用
农田	HCO_3-Ca , $\text{HCO}_3-\text{Ca}-\text{Mg}$, $\text{HCO}_3-\text{SO}_4-\text{Ca}$, $\text{HCO}_3-\text{SO}_4-\text{Ca}-\text{Mg}$, $\text{SO}_4-\text{HCO}_3-\text{Ca}$, $\text{SO}_4-\text{HCO}_3-\text{Ca}-\text{Mg}$ 和 $\text{SO}_4-\text{Ca}-\text{Mg}$	农业活动(灌溉、粪肥和化肥施用等)、土壤性质和水岩作用
建筑用地	HCO_3-Ca , $\text{HCO}_3-\text{Ca}-\text{Mg}$, $\text{HCO}_3-\text{SO}_4-\text{Ca}$, $\text{HCO}_3-\text{SO}_4-\text{Ca}-\text{Mg}$, $\text{SO}_4-\text{HCO}_3-\text{Ca}-\text{Mg}$ 和 SO_4-Ca	生活污水,采矿活动(煤矿)、土壤性质和水岩作用
林地	HCO_3-Ca , $\text{HCO}_3-\text{Ca}-\text{Mg}$, $\text{HCO}_3-\text{SO}_4-\text{Ca}$, $\text{HCO}_3-\text{SO}_4-\text{Ca}-\text{Mg}$, $\text{SO}_4-\text{HCO}_3-\text{Ca}-\text{Mg}$ 和 $\text{SO}_4-\text{Ca}-\text{Mg}$	土壤性质、矿渣堆放(煤矿)和水岩作用

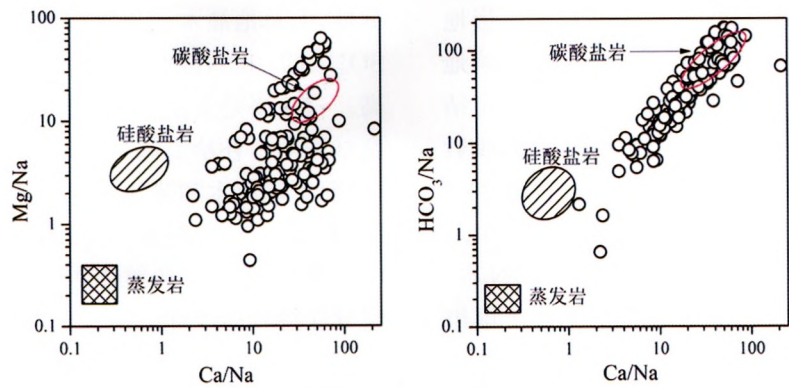


图 7 研究区地下水组分来源图

Fig. 7 Origins of groundwater compositions in the study area

3.5 地下水演化的概念模型

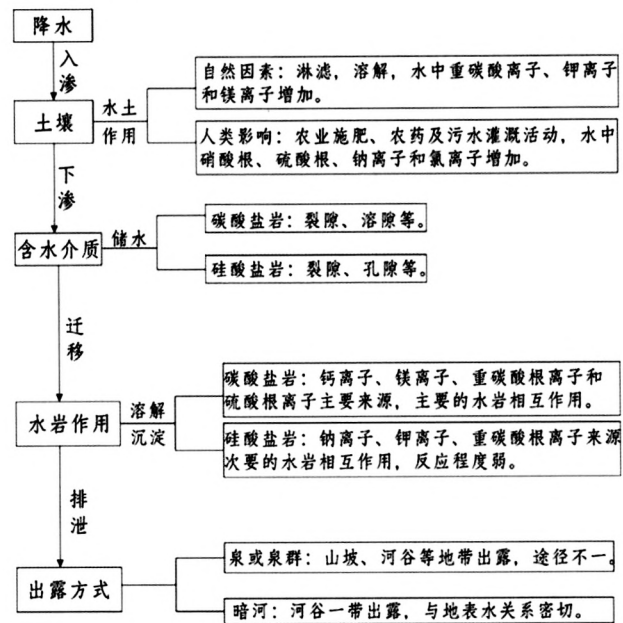


图 8 具有土壤覆盖层的地下水演化概念模型

Fig. 8 Conceptual model of evolution of groundwater with soil cover

基于对研究区地貌特征和水化学分析认识,将地下水演化模型概化为两类:第一类为具有土壤覆盖层的地下水演化方式(图 8),另一类为缺失土壤覆盖层的地下水演化方式(图 9)。前者可表述为:地下水补给源经土壤入渗补给时,土壤层物化性质(固结程度和易溶盐组分)和围岩岩性将影响地下水主组分的演化趋势;后者则表述为:在天坑、落水洞和天窗等地貌区,土壤覆盖层较薄或者缺失时,补给水源直接进入含水层,地下水与围岩相互作用影响地下水组分特征和浓度。本研究区地下水化学过程主要是地下水与碳酸盐岩的相互作用,地下水主组分特征应该相似,

故认为改变地下水组分浓度的主要因子为土地利用类型。

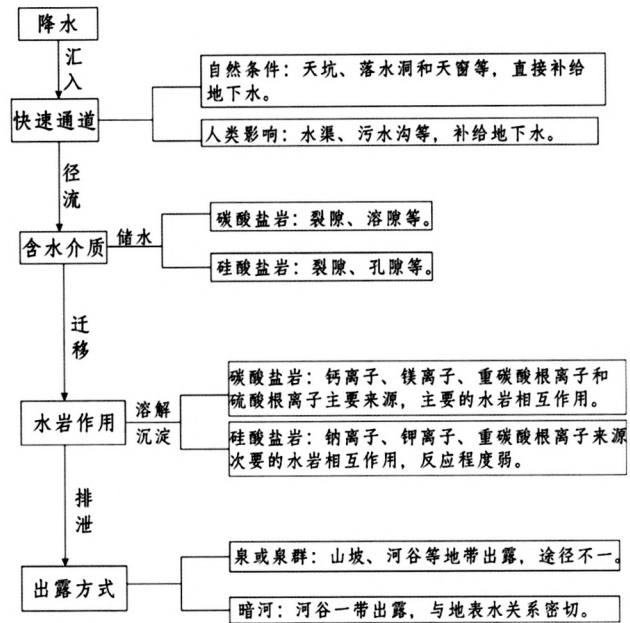


图 9 无土壤覆盖层的地下水演化概念模型

Fig. 9 Conceptual model of evolution of groundwater without soil cover

4 结 论

黔西北裸露岩溶地区土地利用方式主要为农田、林地、草地灌木和建筑用地四类。这四类土地利用方式下土壤易溶盐 and 地下水化学指标具有如下特征和相互关系:

(1)不同土地利用方式下土壤易溶盐组分浓度含量不同。农田和林地区域土壤易溶盐组分 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 和 NO_3^- 浓度较其他土地利用类型土壤组分低,而草地、灌木和建筑用地区域土壤易溶盐中,该

类指标含量却较其他土地利用类型高。

(2)不同土地利用方式下地下水化指标特征具有差异性。农田和林地区地下水 Mg^{2+} 、 K^{+} 、 Na^{+} 、 HCO_3^{-} 、 NO_3^{-} 、碳酸钙饱和指数和白云石饱和指数变化幅度较大。草地灌木区地下水 Mg^{2+} 、 Cl^{-} 、 HCO_3^{-} 和 NO_3^{-} 均值含量较高。建筑用地区域地下水中 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、TDS 值和石膏饱和指数变化范围则是四类土地利用方式下最大的。

(3)绝大多数样品中,土壤易溶盐组分浓度高于地下水中相同的组分,地下水组分浓度高低受自然地理因素(譬如土壤物化性质)和人类活动(生活污水、作物施肥、采煤活动等)的影响。

参考文献

- [1] 蒋忠诚,王瑞江,裴建国,等. 我国南方表层岩溶带及其对岩溶水的调蓄功能[J]. 中国岩溶,2001,20(2):24-28.
- [2] 蒋向明,吉淑华. 岩溶水化学特征在水文地质条件分析中的应用:以娘子关泉群岩溶水系统寿阳区为例[J]. 中国煤田地质,2007,19(4):45-47.
- [3] 裴建国,梁茂珍,陈阵. 西南岩溶石山地区岩溶地下水系统划分及其主要特征值统计[J]. 中国岩溶,2008,27(1):6-10.
- [4] 王学平,李稳哲. 地质构造对鄂尔多斯盆地南缘岩溶地下水的控制作用[J]. 西北地质,2010,43(3):106-112.
- [5] 闫福贵,梁永平,张翼龙,等. 鄂尔多斯盆地周边地区岩溶发育模式及岩溶地下水开发利用探讨[J]. 地学前缘,2010,17(6):227-234.
- [6] 胡伟,吕玉香,熊开治,等. 地层岩性对重庆渝东南渝东北地区岩溶地下水的富集影响分析[J]. 地下水,2014,36(6):188-190.
- [7] 邹胜章,李录娟,卢海平,等. 岩溶地下水系统防污性能评价方法[J]. 地球学报,2014,35(2):262-268.
- [8] Turk J, Malard A, Jeannin P Y, et al. Hydrogeological characterization of groundwater storage and drainage in an alpine karst aquifer (the Kanin massif, Julian Alps) [J]. Hydrological Processes, 2015, 29 (8):1986-1998.
- [9] 潘晓东,梁杏,唐建生,等. 黔东北高原斜坡地区4种岩溶地下水系统模式及特点:基于地貌和蓄水构造特征[J]. 地球学报,2015,36(1):85-93.
- [10] 袁建飞,邓国仕,徐芬,等. 毕节市北部岩溶地下水水文地球化学特征[J]. 水文地质工程地质,2016,43(1):12-21.
- [11] 袁建飞,邓国仕,徐芬,等. 毕节市北部岩溶地下水水化学特征及影响因素的多元统计分析[J]. 中国地质,2016,43(4):1446-1456.
- [12] Wang Y, Guo Q, Su C, et al. Strontium isotope characterization and major ion geochemistry of karst water flow, shentou, northern china[J]. Journal of Hydrology, 2006, 328(3-4):592-603.
- [13] 张群利,郭会荣,吴孔军,等. 荣巩矿区岩溶地下水系统的水文地球化学特征及其指示意义[J]. 水文地质工程地质,2011,38(2):1-7.
- [14] Yuan J, Xu F, Deng G, et al. Using stable isotopes and major ions to identify hydrogeochemical characteristics of karst groundwater in xide country, sichuan province [J]. Carbonates and Evaporites,2018,33:223-234.
- [15] 袁建飞,邓国仕,徐芬,等. 川西南喜德热田地下水水文地球化学特征[J]. 现代地质,2017,31(1):200-208.
- [16] 贾亚男. 农业土地利用对岩溶地下水影响研究综述[J]. 中国岩溶,2003,22(4):306-317.
- [17] 覃小群,蒙荣国,莫日生. 土地覆盖对岩溶地下河碳汇的影响:以广西打狗河流域为例[J]. 中国岩溶,2011,30(4):372-378.
- [18] 贾亚男,袁道先. 土地利用变化对水城盆地岩溶水水质的影响[J]. 地理学报,2003,58(6):831-838.
- [19] 张军以,王腊春,苏维词,等. 岩溶地区人类活动的水文效应研究现状及展望[J]. 地理科学进展,2014,33(8):1125-1135.
- [20] Jiang Y. The impact of land use on soil properties in a karst agricultural region of southwest china: a case study of xiaojiang watershed, yunnan [J]. Journal of Geographical Sciences, 2006, 16(1):69-77.
- [21] Jiang Y, Zhang C, Yuan D, et al. Impact of land use change on groundwater quality in a typical karst watershed of southwest china: a case study of the xiaojiang watershed, yunnan province[J]. Hydrogeology Journal, 2008, 16(4):727-735.
- [22] Jiang Y J, Yuan D X, Zhang C, et al. Impact of land-use change on soil properties in a typical karst agricultural region of southwest china: a case study of xiaojiang watershed, yunnan[J]. Environmental Geology, 2006, 50(6):911-918.
- [23] Li Y, Xie D, Wang S, et al. Impact of land cover types on the soil characteristics in karst area of chongqing[J]. Journal of Geographical Sciences, 2006, 16(2):143-154.
- [24] Yanan J, Daoxian Y. The influence of land use change on karst water quality of shuicheng basin in Guizhou province[J]. Journal of Geographical Sciences, 2004, 14(2):143-150.
- [25] Zhang C, Pei J, Xie Y, et al. Impact of land use covers upon karst processes in a typical fengcong depression system of non-gla, Guangxi, china [J]. Environmental Geology, 2007, 55(8):1621-1626.
- [26] 贾亚男,刁承泰,袁道先. 土地利用对埋藏型岩溶区岩溶水质的影响:以涪陵丛林岩溶槽谷区为例[J]. 自然资源学报,2004,19(4):455-461.
- [27] 王焰新,高旭波. 人类活动影响下娘子关岩溶水系统地球化学演化[J]. 中国岩溶,2009,28(2):103-112.
- [28] Jingan S, Jiupai N, Chaofu W, et al. Land use change and its corresponding ecological responses: A review[J]. Journal of Geographical Sciences, 2005, 15(3):305-328.
- [29] Koh D C, Ko K S, Kim Y, et al. Effect of agricultural land use on the chemistry of groundwater from basaltic aquifers, Jeju Island, South Korea[J]. Hydrogeology Journal, 2007,15(4):727-743.
- [30] 邓国仕,唐业旗,李鹏岳,等. 乌蒙山片区1:5万海子街幅水文地质环境地质调查报告[R]. 成都:中国地质调查局成都地质调查中心,2015:9-36.

Response of hydrogeochemical characteristics to land-use modes in exposed karst areas of northwestern Guizhou Province

YANG Guihua¹, PAN Xiaodong^{2,3}, YUAN Jianfei¹, DENG Guoshi¹, TANG Yeqi¹

(1. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu, Sichuan 610081, China;

2. Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR&GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China;

3. International Research Center on Karst under the Auspices of UNESCO, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract Land use modes are important to assess the impact of human activity on the earth surface, especially in bare karst areas. The hydrogeochemical characteristics can be used in this assessment. This study was based on geological survey combined with remote sensing and hydrochemical analysis of groundwater. The purpose was to reveal the response of hydrogeochemistry to land-use modes in a typical karst agricultural region of Bijie city, Guizhou Province. The major land-use modes include farmland, woodland, grassland and construction land. It was found that there are differences in the concentrations of major ions of groundwater and SI (Saturation Index) values of dominant minerals for these four different land-use modes. In addition, the contents of water-soluble salts of soil are higher than that of major ions of groundwater in almost all of samples, indicating that under the condition of rainfall infiltration recharge, the leaching of water-soluble salts can affect the concentrations of major ions in groundwater. Moreover, the dominant groundwater types are of HCO_3-Ca , $\text{HCO}_3-\text{Ca}-\text{Mg}$, and $\text{HCO}_3-\text{SO}_4-\text{Ca}$ in compositions for these four land-use modes. However, due to the influences of natural geographical factors and human activity, there are differences in the compositions and hydrochemical types for these four land-use modes. Based on these results, two conceptual models are established for the evolution of groundwater in the study area.

Key words karst area, land use, groundwater, hydrochemical characteristics, human activity

(编辑 张玲)