

喀斯特山区文山市水土资源利用变化特征及耦合研究

谭 琨¹, 赵祖军², 赵筱青¹, 普军伟¹, 李代玺³, 李思楠¹, 苗培培¹, 王 茜¹

(1.云南大学 地球科学学院, 昆明 650500; 2.云南省生态环境监测中心,
昆明 650034; 3.云南省文山州气象局, 云南 文山 663000)

摘 要:为了促进喀斯特山区文山市水土资源合理利用、资源环境保护和社会经济可持续发展,从水土资源系统深入分析其时空变化特征,构建喀斯特山区水土资源耦合协调评价指标体系,基于 GIS 技术并运用耦合协调度模型进行了水土资源耦合协调空间栅格尺度的研究。结果表明:(1) 2000—2017 年喀斯特山区文山市降水量较多区域由南部→东南部→西南部转移,农业用水量由南部较多向东南部转移,万元 GDP 用水量较多区域由中部、东南部和北部→西部→东部缩小转移,市域北部的马塘镇、东部和南部水资源开发利用效率明显提升;(2) 2000—2017 年市域东南部耕地面积比例上升最明显,东部市区农用地面积和建设用地面积比例分别明显降低和升高,石漠化面积比例较高区域由东南部、西南部向西北部转移;(3) 2000—2017 年市域水土资源耦合协调整体水平都较高,但 2010 年耦合协调水平最好,其耦合协调度平均值比 2000 年、2017 年都高 0.0167;2010 年高度协调面积比例比 2000 年、2017 年分别高 16.16%,14.21%,中度协调和低度协调比例分别比 2000 年、2017 年低 12.38%,3.79%和 9.98%,4.23%。水土资源耦合协调度与石漠化空间分布一致的规律,说明石漠化对水土资源耦合协调产生很大影响,石漠化治理是喀斯特山区水土资源耦合协调水平提高的关键。

关键词:水土资源利用; 耦合协调度; 喀斯特山区; 文山市

中图分类号:P426.6; F301.24

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)04-0324-09

Utilization Variation Characteristics and Coupling of Water and Land Resources in Wenshan City of Karst Mountain Area

TAN Kun¹, ZHAO Zujun², ZHAO Xiaoqing¹, PU Junwei¹,
LI Daixi³, LI Sinan¹, MIAO Peipei¹, WANG Qian¹

(1.School of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming 650500, China; 2.Yunnan Environmental Monitoring Center, Kunming 650034, China; 3.Wenshan Prefecture Meteorological Bureau of Yunnan Province, Wenshan, Yunnan 663000, China)

Abstract: In order to promote the rational use of water and land resources, resource and environmental protection and sustainable socio-economic development of Wenshan City in the karst mountainous area, we deeply analyzed the characteristics of its spatial-temporal variation from the water and land resources system, and constructed the evaluation index system of water and land resources coupling coordination in karst mountainous areas. Study on the spatial grid scale of water and land resources coupling coordination was based on GIS technology and the coupling coordination degree model. The results show that: (1) from 2000 to 2017, the area with more precipitation in Wenshan City, karst mountain area shifted from the south, to southeast and southwest; the agricultural water consumption was more from the south to the southeast; the regions with more water consumption per ten thousand-Yuan of GDP were transferred from central, southeastern and to northern, western and eastern; the development and utilization rate of water resources improved significantly in Matang Town in the north, east and south; (2) from 2000 to 2017, the proportion of cultivated land area increased most significantly in the southeastern part of the city; the proportions of agricultural land area and construction land area in the eastern urban areas decreased and increased, respectively; the area

收稿日期:2020-09-08

修回日期:2020-10-02

资助项目:云南省科技厅—云南大学“双一流”联合基金重点项目[2018FY001(-017)];国家自然科学基金(42061052,41361020);云南大学研究生创新人才培养项目(C176230200);2020 年云南省教育厅科学研究资助项目;研究生类(2020Y0030)

第一作者:谭琨(1993—),男,湖南耒阳人,硕士研究生,研究方向为水土资源耦合及优化调控。E-mail:534701304@qq.com

通信作者:赵筱青(1969—),女,云南大理人,教授,博士生导师,主要从事水土资源耦合、土地生态安全、国土空间规划研究。E-mail:xqzhao@ynu.edu.cn

with a high proportion of rocky desertification area shifted from southeast and southwest to northwest; (3) the overall level of water and land resources coupling and coordination was relatively high from 2000 to 2017, but the level of coupling and coordination was the best in 2010, and the average value of coupling and coordination degree was 0.016 7 higher than those in 2000 and 2017; the proportion of highly coordinated areas in 2010 was 16.16% and 14.21% higher than those in 2000 and 2017, respectively; the proportions of moderately coordinated and low coordination were 12.38%, 3.79%, and 9.98%, 4.23% lower than those in 2000 and 2017, respectively. In conclusion, the coupling coordination degree of water and land resources was consistent with the spatial distribution of rocky desertification, indicating that rocky desertification had a great impact on the coupling coordination of water and land resources. Rocky desertification control is the key to improve the coupling coordination level of water and land resources in karst mountainous areas.

Keywords: water and land resources utilization; coupling coordination degree; karst mountain areas; Wen-shan City

当前中国正处于城镇化与工业化的快速发展阶段,高强度的人类活动对水土资源利用的广度和深度在不断增强。中国经济的腾飞是以自然资源尤其是土地资源和水资源的过度消耗为代价的^[1-3],且由水土资源耦合利用矛盾导致的资源开发利用效率低、生态环境恶化和社会经济发展滞后等问题尤为突出,严重限制了区域水土资源高效可持续利用和社会经济发展。因此,对区域水土资源耦合协调的研究逐渐成为促进水土资源合理开发利用、水土资源优化配置及调控和社会经济可持续发展的热点问题^[4-7]。

耦合协调系统一般是指两个或两个以上系统之间或系统内部各要素的相互影响、相互作用的关系和协调程度状况^[8],耦合协调研究有利于促进系统之间、系统各要素或系统与要素的结构调整和功能优化,使其向正向方向演替。水土资源系统是一个复杂的整体系统,把水土资源耦合系统作为一个整体进行研究有利于促进水土资源关系朝正向发展,提高水土资源利用效率,增强水土资源承载力。

水土资源耦合研究早期主要集中于水资源系统或土地资源系统内部,较少考虑外部因素的影响,以概念、模型方法和耦合规律的探讨为主^[9-10],但随着资源的消耗、环境的破坏和城市化的发展,国外有学者逐渐将水资源与土地资源看作一个相互影响、相互联系和相互制约的整体进行综合研究^[11-15],但主要集中在对流域或城市水资源与土地资源关系尤其是土地利用对水质的影响方面。国内对水土资源耦合的研究主要集中在水土资源优化配置、水土资源与社会经济可持续发展、水土资源与城市化、生态环境与经济和土地生态安全与社会经济 5 个方面^[16-20]。研究方法主要包括耦合协调度模型、综合指数法、信息熵值法、压力—状态—响应(PSR)模型和 GIS 空间评价分析法等^[21-25],其中,耦合协调度模型应用最广泛,因

为该方法操作性和应用性都较强。研究对象主要集中在对流域、城市、开发区和海湾等宏观尺度的水土资源相互作用关系及耦合规律的探讨^[26-28],对小尺度区域的水土资源耦合研究较少。

喀斯特山区水土资源利用问题已成为制约区域产业和社会经济发展的关键因素。然而,人们对喀斯特山区的水土资源耦合研究很少,亟需探究喀斯特山区在水土资源开发利用过程中的耦合协调状况,为水土资源合理利用与保护、水土资源调控和区域可持续发展提供科学依据。因此,研究以滇东南典型喀斯特山区文山市为例,在大量实地调研和水土资源时空变化特征分析的基础上,构建适用于喀斯特山区的水土资源耦合系统评价指标体系和协调分类体系,并运用水土资源耦合协调度模型结合 GIS 技术,实现对水土资源耦合协调度空间栅格尺度的评价和分析,以期对喀斯特山区的空间水土资源耦合及优化调控研究提供参考。

1 研究区概况

文山市位于中国西南云南省东南部的典型高原喀斯特山区(图 1),地处 103°43'0"—104°27'59"E,23°05'32"—23°42'59"N。全市土地总面积为 2 965.18 km²,山区、半山区占土地总面积的 90%,海拔高差 2 373 m,地形复杂,地势西北高、东南低。土地石漠化严重,2017 年石漠化面积占土地总面积的 19.24%,是中国生态环境最脆弱的地区之一。2017 年土地利用类型以林地和耕地为主,分别占土地总面积的 44.03%,42.69%,建设用地仅占 4.49%,最少的是园地,占 0.54%。2017 年年均降水量为 1 163.97 mm,水资源总量为 12.8 亿 m³,水资源开发利用率仅为 6.42%;文山市 2017 年用水总量为 2.13 亿 m³,其中,农业用水量为 1.22 亿 m³,占总用水量比例最大,达到 57.28%,工业用水量和生

活用水量分别为 0.52 亿 m³, 0.34 亿 m³, 分别占总用水量的 24.50%, 15.90%, 生态用水量为 0.05 亿 m³, 仅占 2.31%。2017 年全市总人口为 50.46 万人, 城镇化率为 58.6%, 人均 GDP 45 723 元。喀斯特山区文山市水土资源短缺问题非常突出, 水土资源利用严重影响着区域社会经济发展。

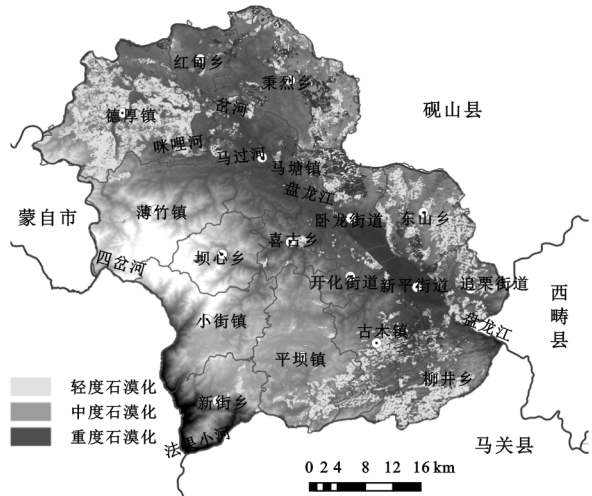


图 1 研究区区位

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源及处理

2017 年遥感影像数据采用欧洲太空局开放存取中心 (<https://scihub.copernicus.eu/>) 10 m 空间分辨率的 Sentinel-2A 数据, 2000 年、2010 年采用美国地质勘探局 (United States Geological Survey, USGS) 30 m 空间分辨率的 Landsat 数据, 基于 ENVI 5.1 和 ArcGIS 10.2 软件, 对 3 期遥感影像进行人机交互式土地利用类型 (耕地、园地、林地、草地、建设用地和水域等) 和石漠化的解译, 并选取了 195 个样本点到实地验证解译结果, 解译精度达到 88.18%, 满足研究需要。水资源数据来源于多年多时段的《文山市水资源综合规划》、《文山州水资源公报》和文山市气象局监测数据; 土地资源数据主要是基于遥感解译结果, 通过 ArcGIS 10.2 软件空间分析技术得到; 人口、GDP 和粮食产出数据来源于文山市统计局统计年鉴, 并通过 GIS 技术对各行政区赋值插值得到其空间评价结果。

年降水量通过气象站点监测数据空间插值得到, 其他水资源各指标运用 GIS 技术通过分流域或行政区统计数据赋值空间插值得到; 耕地面积比例、农业用地面积比例、建设用地面积比例、林地覆盖率、石漠化面积比例和土地开发利用通过 ArcGIS 10.2 软件从解译结果中提取, 然后对各地类分别赋值, 并将其生成 100 m×100 m 的渔网, 以渔网栅格中心点值插值得到; 土壤侵蚀量采用降雨量插值、GIS 的

Hydrology 模块、NDVI 和 RUSLE 模型等计算得到; 人均耕地面积和单位耕地粮食产出通过统计数据赋值空间插值得到。所有空间数据都统一转换为 WGS84-UTM48N 投影坐标系, 根据研究区实际情况、图斑大小和多次试验结果, 上图单元空间尺度确定为 30 m×30 m。

2.2 研究方法

2.2.1 评价指标体系及权重确定 依据喀斯特山区文山市水土资源利用特点和野外实地调研结果, 遵循代表性、典型性、可获取性和科学性等原则, 从水资源系统和土地资源系统两个方面, 共选取了 18 个指标深入分析其时空变化特征, 并以此构建水土资源耦合评价指标体系 (表 1)。喀斯特山区文山市水资源的 双层空间结构, 地表水极易漏失, 加之石漠化面积广泛分布, 土地退化严重, 水土保持能力差, 地表水极难存储, 水资源短缺问题非常突出, 水资源利用问题已成为限制喀斯特山区发展的关键因素之一。另一方面, 喀斯特山区可供利用的耕地和建设用地资源非常少, 利用难度较大, 水土流失严重, 土地产出效益很低, 进行土地利用状况的研究显得尤为迫切。因此, 为了更好地研究喀斯特山区水土资源系统在开发利用过程中的耦合协调水平, 选取了较多的利用性指标。通过最小—最大 (min—max) 极值标准化法对评价指标进行归一化处理, 运用熵值法计算各指标权重^[29-30]。

2.2.2 水土资源时空变化特征分析方法 基于选取的水资源和土地资源各指标, 运用遥感和 GIS 空间分析及统计技术, 分别对 2000 年、2010 年、2017 年的各水土资源指标进行空间制图, 并通过统计方法, 分析喀斯特山区水土资源时空变化特征。

2.2.3 水土资源耦合协调度模型构建

(1) 耦合度模型构建。耦合度是指两个或两个以上系统之间相互作用的程度, 这里指水资源和土地资源两个系统相互作用相互影响的程度。

$$C = n \{ (\theta_1 \times \theta_2 \times \dots \times \theta_n) / (\theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_n)^n \}^{1/n} \tag{1}$$

式中: θ_n 为子系统综合评价指数; n 为子系统数量; C 为耦合度。由于这里只有水资源和土地资源 2 个子系统, 所以 $n=2$, 故 $C = 2 \{ (\theta_1 \times \theta_2) / (\theta_1 + \theta_2)^2 \}^{1/2}$, θ_1 和 θ_2 分别为水资源和土地资源系统综合评价指数。

(2) 协调度模型构建。协调度是指子系统之间或系统要素间相互作用过程中耦合程度的大小, 这里指水资源和土地资源两个系统的耦合程度大小。

$$D = (C \times T)^{1/2} \tag{2}$$

式中: D 为水土资源系统耦合协调度; T 为水资源和土地资源的综合协调指数, 用以反映区域水土资源系

统的整体协调效应; $T=\alpha\theta_1+\beta\theta_2$, α 和 β 分别为水资源系统和土地资源系统贡献度待定系数,由于水资源系统相互影响相互作用,两个子系统作用相同,因此取 $\alpha=\beta=0.5$ 。

表 1 喀斯特山区文山市水资源耦合评价指标体系

子系统	指标名称	单位	含义	权重	属性
水资源系统	年降水量	mm	反映区域水资源来源状况	0.02262847	+
	人均水资源量	m ³ /人	区域人均拥有的水资源量	0.07709078	+
	农业用水量	亿 m ³	农业生产对水资源的需求程度	0.05593529	—
	工业用水量	亿 m ³	工业发展对水资源的需求程度	0.20512562	—
	生活用水量	亿 m ³	日常生活对水资源的需求程度	0.11180661	—
	生态用水量	亿 m ³	生态环境对水资源的需求程度	0.19012142	+
	万元 GDP 用水量	m ³ /万元	水资源的利用效率状况	0.09502347	—
	水资源供需比例	%	水资源的供需匹配状况	0.12894307	+
	水资源开发利用率	%	水资源的开发利用程度	0.11332528	+
	人均耕地面积	hm ² /人	人均拥有的耕地资源状况	0.05342265	+
土地资源系统	耕地面积比例	%	区域耕地资源数量状况	0.02296316	+
	单位耕地粮食产出	kg/hm ²	区域粮食产出能力状况	0.00876993	+
	农业用地面积比例	%	区域农用地资源占有状况	0.00619959	+
	建设用地面积比例	%	区域建设用地资源占有状况	0.39151480	+
	林地覆盖率	%	区域林地覆盖程度	0.05880260	+
	石漠化面积比例	%	反映土地质量及地表水存储状况	0.36179554	—
	土壤侵蚀量	t/(hm ² ·a)	区域水土流失的程度	0.09415648	—
	土地开发利用率	%	土地资源的开发利用程度	0.00237524	+

(3) 水土资源耦合协调分类体系。为充分反映水资源系统和土地资源系统的耦合协调程度,参考相关研究成果,依据协调度计算结果大小,对水土资源系统耦合协调程度进行分类,将喀斯特山区文山市水土资源系统耦合协调程度分为极度协调、高度协调、中度协调、低度协调和失调衰退 5 个等级(表 2)。

表 2 喀斯特山区文山市水土资源耦合协调分类体系

类型划分	协调程度	协调度(D)
协调类	极度协调	0.91~1.00
	高度协调	0.81~0.90
		0.71~0.80
	中度协调	0.61~0.70
	低度协调	0.51~0.60
失调衰退类		
失调衰退类	失调衰退	0.41~0.50
		0.31~0.40
		0.21~0.30
		0.11~0.20
		0.01~0.10

3 结果与分析

3.1 喀斯特山区水资源时空变化特征

3.1.1 水资源量变化特征 2000 年、2010 年、2017 年的年降水量平均值分别为 861.04,799.85,1 163.97 mm,2010 年文山市正逢大旱,降水稀少,而 2017 年

区域平均降雨偏多,水资源较丰富。2000—2017 年降水量较多的区域由南部→东南部→西南部转移,北部降水量一直偏少;2000—2017 年市域西南部和东南部人均水资源量较多,其他区域较少,这与年降水量的空间分布一致,因为降水为区域水资源量的主要来源(图 2)。

3.1.2 产业用水量变化特征 2000—2017 年,农业用水量由南部较多向东南部转移,这主要与东南部的人口快速增长和耕地开垦较多有关;2000—2017 年由于工业企业的不断增多,工业用水量不断增加,工业用水量主要集中在北部工业片区,其次是中东部市区,其他区域很少,但到 2017 年呈现出向南部和东部扩张的趋势,这与东南部的产业快速发展有较大关系;生活用水量不断增加,且主要集中在文山市城区,但到 2017 年明显呈现出东南部多于西北部的特征,这与东南部的人口增加和产业发展有关;生态用水量不断增加,且主要集中在市区,但整体上东南部用水量多于西北部,2010—2017 年明显呈现出向全市范围扩张的趋势,说明生态环境保护得到加强;万元 GDP 用水量不断减少,表明区域用水效率在不断提高。其中 2000—2010 年由万元 GDP 用水量较多的中部、东南部和北部向西部缩小转移,除西部坝心乡

用水量较多之外,其他区域明显减少,2010—2017 年用水量较多区域由西部向东部缩小转移,除东部小范

围外,其他区域用水量都大幅度减少,表明文山市的产业用水效率得到提升(图 2)。

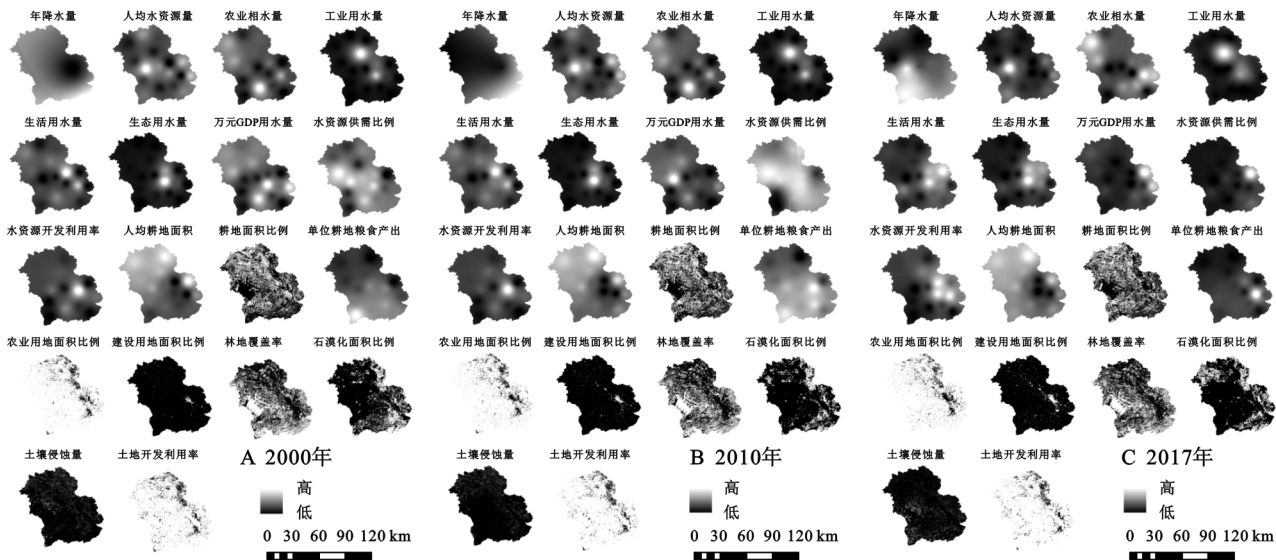


图 2 不同年份的评价指标结果

3.1.3 供需与开发利用变化特征 2000—2010 年除西南部外,其他区域水资源供需比例均大幅度提高,表明区域整体水资源供给能力增强,2010—2017 年供需比例呈现出东南部大于西北部的特征,主要因为东南部产业快速发展和水资源开发力度加大;随着社会经济发展和技术水平的提高,2000—2017 年水资源开发利用程度不断提升,2000 年、2010 年、2017 年的水资源开发利用程度平均值分别为 4.23%,6.50% 和 7.77%。2000—2017 年都是东中部的市区水资源开发利用程度最高,但 2000—2010 年北部的马塘镇开发利用程度有所提高,因为马塘镇发展成为了区域最大的工业片区,2010—2017 年水资源开发利用程度除北部的马塘镇继续提高外,市域东部和南部的开发利用程度也明显提升,因为市域东南部的高原特色农业和民族文化产业迅速发展起来(图 2)。

3.2 喀斯特山区土地资源时空变化特征

3.2.1 耕地资源变化特征 2000—2010 年耕地面积比例大幅度上升,其中,东南部上升最明显,其次是西南部和东北部,主要因为这一时期人口快速增长,对耕地的需求量较大,所以大量耕地被开垦。2010—2017 年全市耕地面积都有所减少,但局部地区有增加,这与退耕还林工程实施的分布区域有关;2000 年、2010 年、2017 年人均耕地面积平均值分别为 0.35,0.34,0.32 hm^2 ,人均耕地面积不断减少,因为人口在不断增加,但农民外出打工较多,很多耕地都被退耕还林了,耕地面积减少。2000—2017 年人均耕地面积整体为东南部少、西北部多,但 2000—2017 年东南部人均耕地

面积明显增加,这与东南部的现代高原特色农业迅速发展有关(图 2)。

3.2.2 耕地粮食产出变化特征 2000—2017 年单位耕地粮食产出不断增加,2000 年、2010 年、2017 年单位耕地粮食产出平均值分别为 1 087.09,1 263.56,1 634.23 kg ,表明文山市土地生产能力在不断提高。2000—2010 年除东北部之外,其他区域粮食产出均明显增加,2010—2017 年单位耕地粮食产出南部多、北部少,其中,东南部的新平街道成为粮食产出的最高区,因为该街道属于市区,不仅拥有优质的耕地资源,还有发达的耕作和种植技术,所以粮食产出较高(图 2)。

3.2.3 土地利用变化特征 2000—2017 年,全市农用地面积比例不断降低,但总体上西部和南部高、东部和北部低,其中,东部的市区农用地面积减少最明显,转为了城镇建设用地;建设用地面积比例不断上升,其中,东部的市区建设用地面积增加最明显,其次是北部的马塘镇和南部各乡镇,这主要是因为城市的扩张、北部工业的发展和南部特色产业的发展都增加了对建设用地的需求;林地覆盖率整体西南部高、东北部低,但局部地区覆盖率变化较明显,这与退耕还林还草和石漠化治理工程实施的空间分布差异有关;土地开发利用程度不断提高,西南部、东南部和西北部变化比较明显,这与区域石漠化空间变化、产业布局及发展程度有关(图 2)。

3.2.4 石漠化变化特征 2000—2017 年石漠化面积比例总体呈下降趋势,其中,2000—2010 年东南部石漠化面积大量减少,而西北部却增加,呈现出东南部

向西北部转移的趋势,这与石漠化治理、退耕还林还草和人类活动强度有较大关系,2010—2017 年西北部石漠化面积继续增加,东南部 and 西南部减少(图 2),这种变化与区域水土资源禀赋和石漠化治理工程实施的时间长短及空间分布差异有关。

3.2.5 土壤侵蚀量变化特征 2000—2017 年土壤侵蚀量总体呈增加趋势,2000 年、2010 年、2017 年土壤侵蚀量平均值分别为 65.20、50.20、917.39 t/(hm²·a),其中,2010—2017 年土壤侵蚀量大幅度增加,主要因为该时期降雨较多,加之喀斯特山区坡度较大、土层薄,地表径流侵蚀严重,极易引起水土流失;2000—2010 年土壤侵蚀量西南部低、东北部高,但 2010 年西南部侵蚀量明显减少,主要因为西南部植被覆盖率提高,加之 2010 年文山市正逢大旱,降水少,雨水的侵蚀作用明显减弱。2010—2017 年土壤侵蚀量较多区域由东北部向西南部和东南部转移,这与降雨和石漠化的空间变化有关(图 2)。

3.3 喀斯特山区水土资源耦合协调特点分析

3.3.1 水土资源耦合协调度数量结构变化特征 文山市 2000 年水土资源耦合协调整体水平较高,水土资源耦合协调度为 0.409 8~0.855 7,平均值为 0.683 8,属于协调类,处于中度协调中上状态。从各耦合协调度等级面积比例来看,高度协调面积最大,为 163 015.59 hm²,占土地总面积的 54.98%,中度协调次之,面积为 97 453.02 hm²,占全市总面积的 32.87%,低度协调面积最小,为 36 048.90 hm²,仅占 12.16%(图 3)。

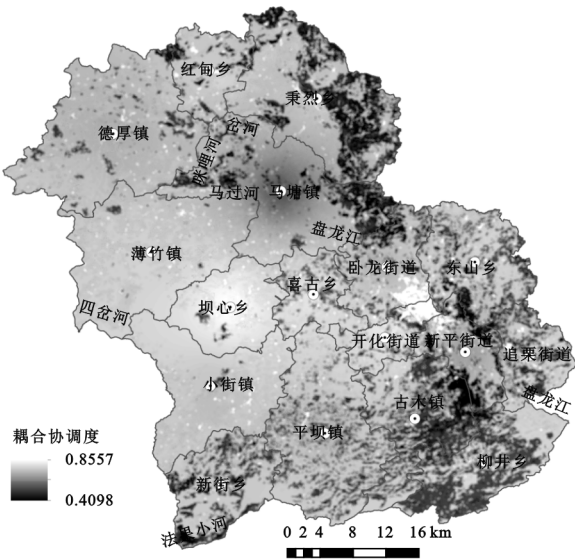


图 3 2000 年水土资源耦合协调度评价结果

文山市 2010 年水土资源耦合协调整体水平较高,水土资源耦合协调度为 0.456 4~0.857 7,平均值为 0.700 5,属于协调类,处于中度协调偏上状态,从各耦合协调度等级面积比例来看,高度协调面积最大,为

210 938.07 hm²,占土地总面积的 71.14%,中度协调次之,面积为 60 754.98 hm²,占全市总面积的 20.49%,低度协调面积最小,为 24 824.46 hm²,仅占 8.37%(图 4)。

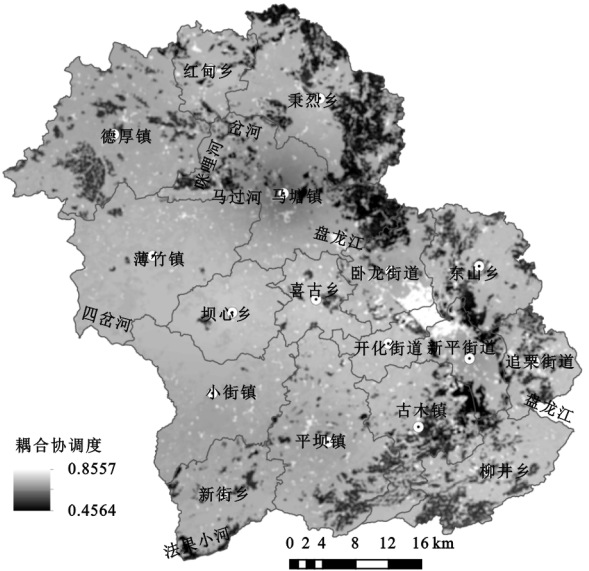


图 4 2010 年水土资源耦合协调度评价结果

文山市 2017 年水土资源耦合协调整体水平较高,水土资源耦合协调度为 0.436 7~0.825 6,平均值为 0.683 8,属于协调类,处于中度协调中上状态。从各耦合协调度等级面积比例来看,高度协调面积最大,为 168 815.97 hm²,占土地总面积的 56.93%,中度协调次之,面积为 90 334.44 hm²,占全市总面积的 30.47%,低度协调面积最小,为 37 367.10 hm²,仅占 12.60%(图 5)。

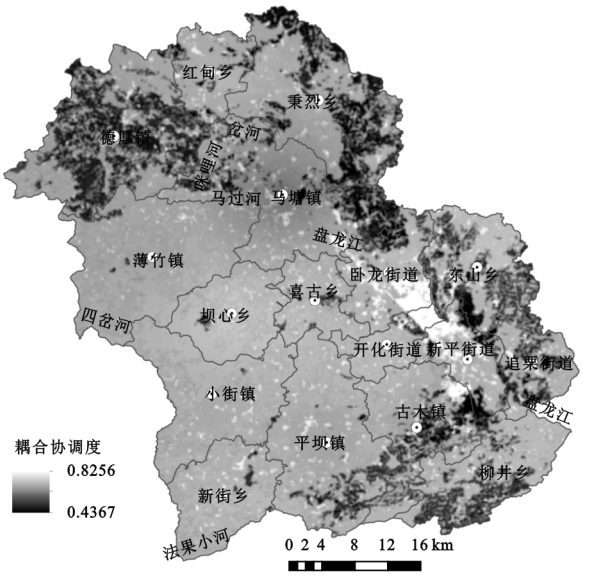


图 5 2017 年水土资源耦合协调度评价结果

由此可见,2000—2017 年喀斯特山区文山市水土资源耦合协调整体水平都较高,其中,2010 年水土资源耦合协调水平最好,2000 年、2017 年水土资源耦合协调水平趋同,相比 2010 年耦合协调水平都较

低,这主要是因为2010年石漠化面积比例比2000年、2017年都要低,石漠化区域地表水易漏失、水土流失严重,极易导致水土资源系统失衡,对水土资源耦合协调水平影响很大。2000年、2017年水土资源耦合协调度平均值都为0.683 8,2010年的耦合协调度平均值比2000年、2017年都高0.016 7。2010年高度协调面积比例比2000年、2017年分别高16.16%,14.21%,中度协调面积比例分别比2000年、2017年低12.38%,9.98%,低度协调面积比例分别比2000年、2017年低3.79%,4.23%。

3.3.2 水土资源耦合协调时空变化特征 2000年市域东北部、东部和南部水土资源耦合协调性较差,尤其是东北部和东南部最为明显,西部水土资源耦合协调水平较高(图3);2010年市域东部、北部和南部水土资源耦合协调性较差,东北部和东南部仍然为低协调面积分布最广的区域,西部和中部水土资源耦合协调水平较高(图4);2017年市域西北部、东北部、东部和东南部水土资源耦合协调性较差,西部、西南部和中部水土资源耦合协调水平较高(图5)。可以看出,2000—2017年喀斯特山区文山市东北部、东部和东南部水土资源耦合协调性一直都较差,西部和中部耦合协调水平较高,其中,文山市市区水土资源耦合协调水平一直都较高。2000—2010年东北部、东部和东南部水土资源耦合协调度都较低,但2010年相比2000年西北部水土资源耦合协调性变差,西南部耦合协调水平提高,市区水土资源耦合协调度最高;2010—2017年西北部大面积区域水土资源耦合协调性变差,西南部耦合协调水平继续得到提高,市区水土资源耦合协调度仍然最高;2000—2017年西北部和西南部水土资源耦合协调水平变化最明显,其耦合协调度分别降低和提高,这与石漠化面积比例空间分布变化直接相关,2000—2017年西北部石漠化面积增加,而西南部石漠化面积减少(图3—5)。

3.3.3 水土资源耦合协调水平空间差异因素 文山市市区水土资源耦合协调水平一直都较好,主要是因为作为区域社会经济发展的中心,这里坝区面积大,无石漠化,土壤侵蚀量少,基础设施和水利设施完善,水资源开发利用率高,水资源调配能力和供给保障能力较强,水土资源条件良好,有利于水土资源系统的协调与平衡;市域水土资源耦合协调度较高的区域基本上无石漠化,年降水量多,林地覆盖率较高,植被生态系统涵养水源、水土保持和调节水土资源的能力较强,另外,区域耕地面积分布也较大,耕地的水土资

源条件一般都较好,所以整体水土耦合协调水平较高;水土资源耦合协调性较差区域大部分位于石漠化较严重处,土地资源质量低,坡度大,加之喀斯特地貌地表水渗漏严重,保水能力非常差,水土资源匹配水平低,应通过退耕还林、退耕还草和坡耕地改造等生态修复工程措施,加大对石漠化的治理力度,改善水土资源条件,提高水土资源开发利用率,促进水土资源耦合协调程度的提升。同时,水土资源耦合协调度呈现出和土地石漠化空间分布一致的规律,无石漠化区域水土资源耦合协调度处于高度协调状态,有石漠化的区域为中度协调和低度协调状态,且石漠化程度越高,耦合协调度越低,说明土地石漠化对水土资源耦合协调度产生较大影响。总之,要想提高文山市整体的水土资源耦合协调水平和社会经济发展水平,必须加强生态环境治理和保护,并提出符合喀斯特山区文山市实际的发展模式,促进产业发展和升级改造,提高水土资源利用效率。

4 讨论与结论

4.1 讨论

(1) 评价指标体系的探讨。本文从水资源和土地资源系统两个方面共选取了18个指标,详细分析各指标时空变化特征,并构建水土资源耦合协调评价体系,研究水土资源系统相互影响和相互制约的联动特征。在水资源系统方面,大部分研究主要选取了降水量、水资源量、用水量和水资源供需状况等指标,喀斯特山区水资源的二元结构,使地表水资源非常匮乏,且开发利用难度大,影响区域水土资源的匹配水平和动态平衡;喀斯特山区水资源利用率低下,是限制区域社会经济发展的关键因素,并影响着土地资源的开发利用及水土资源耦合协调水平;其他指标均能较好地反映喀斯特山区降水量、用水量和供需水等状况。在土地资源系统方面,人们主要选取了耕地、粮食产量、森林覆盖率和建设用地等指标,石漠化面积比例是喀斯特地区特殊的指标,石漠化不仅使土地质量下降且利用难度增大,而且容易导致地表水流失,加剧水土流失,从而影响整个区域的水土资源平衡和耦合协调水平;喀斯特山区山地多坝区少,耕地、农用地和建设用地面积比例能体现对土地资源的利用状况,其他指标都能较好地反映喀斯特山区土地资源数量与质量、耕地产出能力、开发利用程度和土壤侵蚀状况等。然而,为了更好地探讨水土资源在开发利用过程中的耦合协调水平,未来可在水资源系统和土地

资源系统两方面构建指标体系的基础上,从资源的供给、需求和开发利用3个角度,对评价指标体系进行更深入的分类,加强对水土资源的供需平衡与开发利用过程的理解,拓展水土资源耦合研究的广度和深度,促进区域水土资源的合理利用。

(2) 水土资源耦合协调的综合探讨。水土资源系统是非线性、复杂和多层次的整体系统,构成系统的各要素既相互促进又相互制约,协同演化,开展水土资源耦合研究有利于识别区域水土资源的协调状况,提高水土资源利用效率。国际上,对水土资源的研究主要集中在利用遥感、地信、统计和系统动力学等对土地利用与覆被变化、土地利用与流域水资源关系、土地利用与生态安全和区域水土资源优化配置等进行探讨^[31-32]。最近出现了以系统耦合协同理论为基础,运用非线性系统、复杂系统和耗散系统等进行系统内部要素的关系及系统整体状态变化的评价和分析,如区域经济与环境系统、农业环境与经济发展、生态环境与社会经济和城镇化与土地利用等。然而,对多系统的空间耦合协调和小尺度区域的水土资源耦合研究还需进一步深入,尤其是喀斯特山区。因此,研究以滇东南典型喀斯特山区文山市为例,对水土资源耦合协调时空变化状况进行评价和分析,并依据评价结果和喀斯特山区水土资源利用特点,构建了喀斯特山区水土资源耦合协调度分类体系,研究突破了以往以行政单元为评价尺度,实现了跨区域的空间栅格单元水土资源耦合协调度评价结果,评价精度得到提高。但论文对水资源与土地资源的影响机制、协同响应机制和驱动因素等还未进一步探讨,在未来的水土资源耦合研究中,应通过建立开放式的水土资源综合系统,将水土资源系统及相关影响因素构成的系统有机地结合起来,对水资源系统、土地资源系统及协同影响机制和驱动力等进行综合分析,将是实现水土资源耦合综合研究的重要方向。

4.2 结论

(1) 2000—2017年降水量较多区域由南部→东南部→西南部转移,人均水资源量空间变化不大;2000—2017年农业用水量由南部较多向东南部转移,市域北部的工业区工业用水量最多,市区的生活和生态用水量最多;2000—2017年万元GDP用水量较多区域由中部、东南部和北部→西部→东部缩小转移,水资源供需比例整体上东南部高于西北部,东中部的市区水资源开发利用效率最高,但市域北部的马塘镇、东部和南部明显提升。

(2) 2000—2010年东南部耕地面积比例上升最明显;2000—2010年除东北部之外,单位耕地粮食产出均明显增加,2010—2017年南多北少;2000—2017年市区农用地面积比例降低最明显,而建设用地面积比例上升最明显;石漠化面积比例较高区域由东南部、西南部向西北部转移;2000—2010年西南部土壤侵蚀量大量减少,2010—2017年较多区域由东北部向西南部和东南部转移;土地开发利用效率西南部、东南部和西北部变化较明显。

(3) 2000—2017年文山市水土资源耦合协调度水平都较高,但2010年水土资源耦合协调水平最好,2010年的耦合协调度平均值比2000年、2017年都高0.0167。2010年高度协调面积比例比2000年、2017年分别高16.16%,14.21%,中度协调面积比例分别比2000年、2017年低12.38%,9.98%,低度协调面积比例分别低3.79%,4.23%。从空间分布看,2000—2017年市域东北部、东部和东南部水土资源耦合协调性一直都较差,西部和中部较好,其中,西北部和西南部水土资源耦合协调水平变化最明显,其耦合协调度分别明显降低和升高。水土资源耦合协调度与土地石漠化空间分布一致的规律,石漠化程度越高,耦合协调度越低,说明石漠化对水土资源耦合协调产生很大影响。

参考文献:

- [1] Lian H, Lejano R P. Interpreting institutional fit: Urbanization, development, and China's "Land-Lost"[J]. *World Development*, 2014, 61: 1-10.
- [2] Liu Y, Huang X, Yang H, et al. Environmental effects of land-use/cover change caused by urbanization and policies in Southwest China Karst area: A case study of Guiyang[J]. *Habitat International*, 2014, 44: 339-348.
- [3] 张平,孙强强,孙丹峰,等.基于遥感光谱的干旱区土地退化评价体系构建[J].*农业工程学报*, 2019, 35(9): 228-237.
- [4] Xie Z H, Zeng Y J, Xia J, et al. Coupled modeling of land hydrology-regional climate including human carbon emission and water exploitation[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2017, 8(2): 68-79.
- [5] Liu D, Liu C, Fu Q, et al. Construction and application of a refined index for measuring the regional matching characteristics between water and land resources[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 91: 203-211.
- [6] Ling H, Yan J, Guo B, et al. Evaluation of water and land exploitation based on the ecosystem service value in a hyper-arid region with intensifying basin management

- [J]. Land Degradation and Development, 2019, 30(18): 2165-2176.
- [7] 高爽, 吴磊, 迟宇博, 等. 多因素耦合作用下黄土植被坡面水沙养分流失模拟[J]. 水土保持学报, 2020, 34(4): 104-111.
- [8] 熊建新, 陈端吕, 彭保发, 等. 洞庭湖区生态承载力系统耦合协调度时空分异[J]. 地理科学, 2014, 34(9): 1108-1116.
- [9] Chai J, Wang Z, Zhang H. Integrated evaluation of coupling coordination for land use change and ecological security: a case study in Wuhan City of Hubei Province, China [J]. International Journal of Environmental Research & Public Health, 2017, 14(11). DOI: 10.3390/ijerph14111435.
- [10] 周鹏, 邓伟, 彭立, 等. 典型山地水土要素时空耦合特征及其成因[J]. 地理学报, 2019, 74(11): 2273-2287.
- [11] Kaushal S S, Gold A J, Mayer P M. Land use, climate, and water resources: global stages of interaction [J]. Water, 2017, 9. DOI: 10.3390/w9100815.
- [12] Kumar N, Tischbein B, Kusche J, et al. Impact of land-use change on the water resources of the Upper Kharun Catchment, Chhattisgarh, India [J]. Regional Environmental Change, 2017, 17(2): 2373-2385.
- [13] Hyandye C B, Worqul A, Martz L W, et al. The impact of future climate and land use/cover change on water resources in the Ndembera watershed and their mitigation and adaptation strategies [J]. Environmental Systems Research, 2018, 7(1): 1-24.
- [14] Li J, Fei L, Li S, et al. The influence of optimized allocation of agricultural water and soil resources on irrigation and drainage in the Jingdian Irrigation District, China [J]. Irrigation Science, 2019, 38(3): 37-47.
- [15] 崔学刚, 方创琳, 刘海猛, 等. 城镇化与生态环境耦合动态模拟理论及方法的研究进展[J]. 地理学报, 2019, 74(6): 1079-1096.
- [16] 吕添贵, 吴次芳, 游和远. 鄱阳湖生态经济区水土资源与经济发展耦合分析及优化路径[J]. 中国土地科学, 2013, 27(9): 3-10.
- [17] 赵月望, 解建仓, 黄银兵, 等. 城市化进程中区域水土资源复合开发效应[J]. 水土保持学报, 2012, 26(2): 224-228.
- [18] 赵丽平, 李邦熹, 王雅鹏, 等. 城镇化与粮食生产水土资源的时空耦合协调[J]. 经济地理, 2016, 36(10): 147-154.
- [19] 周鹏, 邓伟, 彭立, 等. 典型山地水土要素时空耦合特征及其成因[J]. 地理学报, 2019, 74(11): 2273-2287.
- [20] 李丹, 胡国华, 黎夏, 等. 耦合地理模拟与优化的城镇开发边界划定[J]. 中国土地科学, 2020, 34(5): 104-114.
- [21] 张卡, 曲本亮, 盖美. 区域经济发展与水土资源的耦合协调研究: 以辽宁省为例[J]. 资源开发与市场, 2015, 31(3): 316-320.
- [22] 刘宝涛, 郗瑞卿, 王冬艳, 等. 长吉图先导区城镇化与水土资源系统耦合协调性分析[J]. 吉林农业大学学报, 2016, 38(1): 80-86.
- [23] 文倩, 孟天醒, 范慧平, 等. 河南省水土资源与经济发展耦合效应及其时空分异[J]. 水土保持研究, 2017, 24(3): 234-240.
- [24] Liu J, Jin X B, Xu W Y, et al. A new framework of land use efficiency for the coordination among food, economy and ecology in regional development [J]. Science of the Total Environment, 2020, 710. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135670.
- [25] 姜旭, 卢新海. 长江中游城市群城镇化与人居环境耦合协调的时空特征研究[J]. 中国土地科学, 2020, 34(1): 25-33.
- [26] 崔盼盼, 赵媛, 夏四友, 等. 黄河流域生态环境与高质量发展测度及时空耦合特征[J]. 经济地理, 2020, 40(5): 49-57.
- [27] 刘刚, 李鹏, 张旭, 等. 西安市水土流失空间分布特征与管控空间划分[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3): 91-97.
- [28] Ducrot R, Page C L, Bommel P, et al. Articulating land and water dynamics with urbanization: an attempt to model natural resources management at the urban edge [J]. Computers Environment & Urban Systems, 2004, 28(1): 85-106.
- [29] 赵筱青, 谭琨, 易琦, 等. 杞麓湖流域生态安全性及在各因子中的变化特征[J]. 水土保持研究, 2019, 26(3): 285-292.
- [30] 赵筱青, 谭琨, 易琦, 等. 典型高原湖泊流域生态安全格局构建: 以杞麓湖流域为例[J]. 中国环境科学, 2019, 39(2): 768-777.
- [31] Shirmohammadi B, Malekian A, Salajegheh A, et al. Scenario analysis for integrated water resources management under future land use change in the Urmia Lake region, Iran [J]. Land Use Policy, 2020, 90. DOI: 10.1016/j.landusepol.2019.104299.
- [32] Aghsaei H, Dinan N M, Moridi A, et al. Effects of dynamic land use/land cover change on water resources and sediment yield in the Anzali wetland catchment, Gilan, Iran [J]. Science of the Total Environment, 2020, 712. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.136449.