

典型山地水土要素时空耦合特征及其成因

周 鹏^{1,3}, 邓 伟^{1,2,3}, 彭 立^{1,2}, 张少尧^{1,3}

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所 山区发展研究中心, 成都 610041; 2. 四川师范大学
地理与资源科学学院, 成都 610101; 3. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘要: 水土资源是人类生存的基础, 山地水土要素耦合性与“三生空间”的功能性密切相关, 其耦合的时空过程及规律关乎山区的生态服务与经济社会可持续发展。通过构建更加科学的水土要素耦合指数对太行山地、横断山地、黔桂喀斯特山地水土要素耦合特征进行大尺度、长时序的分析, 并采用地理探测器方法分析了各时期水土耦合的影响因素。结果表明: ① 三大山地水土要素耦合空间差异十分显著。太行山地以缺水区为主, 横断山地以平衡区为主, 黔桂喀斯特山地平衡区和充沛区兼有。② 垂直分异上, 三大山地水土要素耦合指数分别在 1300 m、1800~3400 m、500~1500 m 处发生变异。各山地水土要素耦合指数在生态功能亚区表现为, 林地生态亚区>林草复合生态亚区>农业生态亚区。③ 三大山地水土要素耦合的空间异质性是自然要素和人文要素综合作用的结果。其中, 气候要素为主导驱动, 地形地貌和土地利用居次, 人为作用叠加在自然作用之上, 加剧了水土要素耦合的时空复杂性和变异性。本文构建的水土要素耦合指数, 加深了山地水土要素相互作用的时空过程研究, 可为促进变化环境下的山区可持续发展提供决策依据。

关键词: 水土要素; 耦合特征; 时空分异; 地理探测器; 典型山地

DOI: 10.11821/dlxb201911006

1 引言

变化环境下陆地表层正在经历快速演变过程, 其中以水土要素耦合时空过程、特征与规律都呈现出一些新的特点, 对自然生态和农业生态都产生了直接或间接的影响。尤其是在山地, 由于地形的复杂性, 土地空间异质性强, 降水时空差异大, 水土要素耦合的程度具有极明显的变异性和不确定性。此外, 山地是复合、开放的立体系统, 不仅对全球气候变化敏感, 而且在不断加强的人类活动影响下, 其生态系统不确定性和脆弱性表现的更加突出。水土要素是陆地表层最活跃的要素, 也是人类社会生产、生活的基础性资源, 水土资源的丰富程度及匹配水平表征了区域资源的基本保障程度^[1], 其空间耦合性对区域粮食生产和耕地可持续利用有重要影响^[2]。中国山地面积占陆域国土的 65%, 近 40% 的人口生活在山区, 山地是生态建设的主战场, 是国家经济社会发展的重要区域^[3]。在气候变化和人类活动双重作用下, 山地水土要素耦合作用的时空过程、效应与差异越发明显, 水土要素耦合趋向失调、失衡状态, 直接影响生态服务, 严重制约了农业生产和农村发展^[4]。

收稿日期: 2019-05-14; 修订日期: 2019-10-09

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 计划) (2015CB452700) [Foundation: National Basic Research Program of China, No.2015CB452700]

作者简介: 周鹏(1988-), 男, 陕西横山人, 博士生, 研究方向山区资源环境与国土空间管理。E-mail: zhoupeng726@sina.com

通讯作者: 邓伟(1957-), 男, 辽宁沈阳人, 博士, 研究员, 主要从事山区资源环境与国土空间发展研究。

E-mail: dengwei@sicnu.edu.cn

山地水土要素耦合度是国土空间功能优化的重要参数，特别是当前伴随着山区城镇化、工业化和农业现代化的快速推进，以及扶贫移民和避灾搬迁等，都将使山区土地利用格局产生明显变化，对水资源供给与保障提出了新的要求，山地国土空间开发和水资源配置关系的协调尤为关键。目前关于水土要素耦合方面的研究主要集中在水土资源平衡或耦合关系、优化配置以及水土资源与城镇化、乡村聚落、粮食安全等方面^[5-12]，研究方法多采用耦合协调度、匹配系数、线性规划等^[13-16]，研究尺度涵盖了行政单元、灌区及公里格网^[17-19]。总体上，已有研究多侧重于生产空间或生活空间单一功能空间的水土耦合，且多以静态研究为主，缺少综合考虑生产、生活、生态空间的水土要素耦合动态变化的研究，对水土要素相互作用关系认识仍需深化，尤其是山地水土要素耦合的垂直分异特征。由于常用的耦合协调度不能有效刻画水土要素耦合变化过程所呈现的丰缺程度，也缺乏水土要素耦合的成因探讨，导致科学认知的基础仍显薄弱。因此，以三大典型山地（太行山地、横断山地、黔桂喀斯特山地）为研究区，从水土要素耦合时空过程入手，探究水土要素相互作用关系，定量揭示水土耦合垂向变异性，以及综合考虑自然和人文驱动因素阐释其作用机制，为基于山区国土空间功能优化的水土调控提供重要参考。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

太行山地、横断山地、黔桂喀斯特山地分别处于黄土高原向华北平原过渡区、青藏高原向云贵高原和四川盆地过渡区、云贵高原向东南丘陵过渡区（图1），均属于中国八大生态脆弱区，是华北平原、长江上游、珠江上游重要的水源涵养、生物多样性保护和水土保持区域，是国家生态文明建设的关键区。区域内水—土—气—生—岩的系统差别

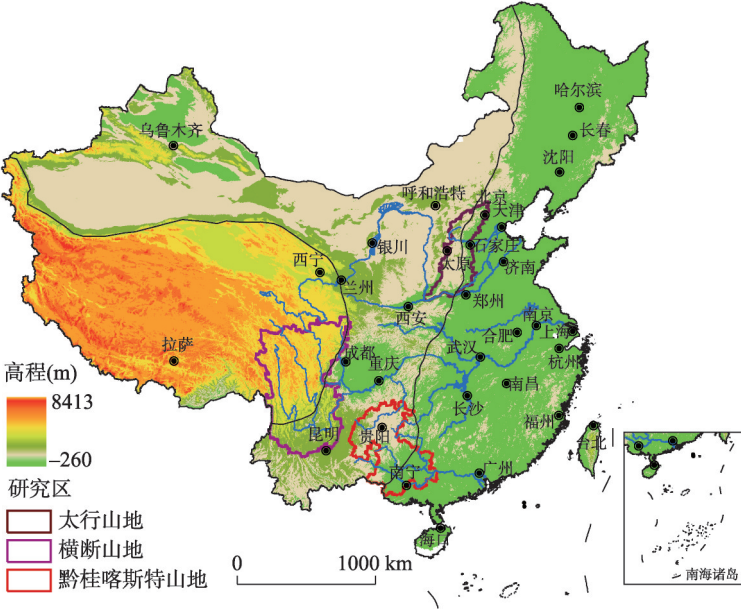


图1 三大山地区位示意图
Fig. 1 Location of the three mountainous areas

巨大, 水土耦合的土地覆被与生态效应明显不同, 人类活动的胁迫产生的压力也有明显差别 (表1)。因此, 三大山地的水土耦合特征的比较研究具有学科探究性。

表1 三大山地基本概况
Tab. 1 The basic situations of three mountainous areas

山区名称	面积 (万 km ²)	县级行政 单元(个)	常住人口 (万人)	GDP (亿)	水—土—岩特征
太行山地	13.7	115	4108	14358	土地贫瘠, 垦殖率高, 降水变率大, 水资源匮乏、水分调蓄能力差
横断山地	45.0	99	2004	5707.7	地形切割剧烈, 构造运动活跃, 地质灾害频繁, 耕地分散, 取水困难
黔桂喀斯特山地	22.5	102	4304	15329	峰丛洼地, 山高坡陡, 地表缺水少土, 溶岩成土速率慢, 土薄易旱

2.2 数据来源

研究数据主要包括: ① 山地土地利用数据, 包括1990年、1995年、2000年、2005年、2010年、2015年6个时期, 来源于中国科学院资源环境数据中心 (<http://www.resdc.cn/Default.aspx>); ② 土壤含水量和土壤容重来源于北京师范大学的《面向陆面过程模型的中国土壤水文数据集》和《面向陆面模拟的中国土壤数据集》; ③ 气象数据来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>)。其中降水来源于中国地面降水月值0.5°×0.5°格点数据集 (V 2.0); ④ 土壤质地、气温、人口、GDP、DEM、地貌类型、土壤类型数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心; ⑤ 各植被地表径流系数来源于《生态保护红线划定指南》^[20]。

2.3 研究方法

研究的基本思路以土地利用为基础, 以水土要素为核心, 考虑降水的有效性, 构建了水土要素耦合指数, 综合对比三大山地水土要素耦合指数的时空差异性、垂直变异性、内部分异性, 揭示其时空格局和地域特征。在此基础上, 选择气候要素、地形地貌、土地利用和人口经济对研究区6个时期分别进行成因探测。

(1) 水土要素耦合指数 (Coupling Index of Water-Land Elements, CIWL) 是指自然状态下年平均有效降水量和土地利用需水量之间为实现一定地域功能而达到的平衡状态:

$$C = W/L \tag{1}$$

式中: C 表示水土要素耦合指数; W 表示有效降水量; L 表示土地利用的需水量。根据水土要素指数耦合程度, 将其划分为缺水区 ($C < 0.85$)、平衡区 ($0.85 \leq C \leq 1.8$)、充沛区 ($C > 1.8$) 3种类型,

(2) 有效降水量由水域空间和建设空间的天然降水量、林草地的年有效降水量和农作物年有效降水量4部分组成:

$$W_k = \begin{cases} P, & (k = \text{建设空间或水域空间}) \\ (1 - a_i) \times P, & (k = \text{草地}) \\ (1 - a_i) \times P - I_c, & (k = \text{林地}) \\ P_e, & (k = \text{耕地}) \end{cases} \tag{2}$$

式中: W_k 为有效降水量; a_i 为各种植被地表径流系数; I_c 为林冠年降水截留量; P 为年降水量; P_e 为农作物年有效降水量; k 为土地利用类型。其中, 林冠年降水截留量和农作物年有效降水量的算法如下^[21]:

$$I_c = 11.42 + 7.05 \times 10^{-5} P^2 \tag{3}$$

$$P_e = \begin{cases} 12 \times [P_m(125 - 0.2P_m)/125], & (p_m \leq 250 \text{ mm}) \\ 12 \times (125 + 0.1P_m), & (p_m > 250 \text{ mm}) \end{cases} \quad (4)$$

式中： I_c 为林冠年降水截留量； P 为年降水量； P_e 为农作物年有效降雨量； P_m 为月降雨量。

(3) 土地利用的需水量主要包括水域空间需水量和建设空间需水量、林草地生态需水量和农作物需水量。

$$L_k = \begin{cases} E_{vp}, & (k = \text{建设空间}) \\ ET_n, & (k = \text{水域空间}) \\ ET_{mi}, & (k = \text{林草地}) \\ ET_p, & (k = \text{耕地}) \end{cases} \quad (5)$$

式中： E_{vp} 为建设空间需水量，采用实际蒸发量表示； ET_n 为水域空间需水量，采用潜在蒸散发量表示； ET_{mi} 为林草地需水量； ET_p 为农作物需水量； k 为土地利用类型。林草地需水量、作物需水量计算公式如下^[22]：

① 林草地最小生态需水量 由于三大山地植被类型多样，难以采用一种或几种植被代替，所以采用最小生态需水量计算方法，间接得到林草地的需水量。最小生态需水量由最小土壤含水量和最小蒸散量2部分组成。

本文采用临界土壤有效含水量表示最小土壤含水量，其值大约为田间持水量的70%~80%。关于田间持水量、凋萎系数和土壤容重的取值，草地采用前6层（0~0.493 m）平均值、林地采用前7层（0~0.829 m）平均值。

通常认为在水分供应不充足的条件下，实际蒸散与潜在蒸散成正比，即：

$$ET_a = \beta \times ET_n, \quad \beta = W/W_k \quad (6)$$

式中： ET_a 代表最小蒸散量； ET_n 为潜在蒸散量； β 为蒸发比系数； W 为土壤有效含水量； W_k 是临界土壤有效含水量，其值大约为田间持水量的70%~80%，本文取75%。

② 作物需水量 利用FAO推荐的方法计算作物全生育期需水量，公式为：

$$ET_p = ET_0 \times K_p \times K_s \quad (7)$$

式中： ET_p 为作物需水量； ET_0 为参考作物蒸发蒸腾量； K_p 为作物系数，各地区作物系数参考相关研究^[23-30]； K_s 为土壤水分限制系数，不同土壤质地水分限制系数借鉴已有研究成果^[31]。

(4) 地理探测器分析方法。地理探测器是探测空间分异性，以及解释其背后驱动因子的一种新的统计学方法^[32]。地理探测器擅长自变量 X 为类型量，因变量 Y 为数值量的分析，通过将各类因子经过不同的离散分类处理，来探测因变量与自变量之间空间分布格局的异质性，采用决定力（ q 值）来度量自变量对因变量的解释度， $q \in [0, 1]$ ，值越大表示自变量 X 对属性 Y 的解释力越强，反之越弱。

3 结果与分析

3.1 水土要素耦合时空特征

3.1.1 太行山地水土要素耦合时空特征 1990-2015年太行山地绝大部分地区处于缺水區，平衡区占比很小，充沛区近乎于零（图2）。1990年、1995年、2000年、2005年、2010年和2015年太行山地水土要素耦合的年际变化呈现出先扩大后缩小的特点，缺水區面积占比分别为60%、80%、89%、95%、96%、80%。平衡区空间分布存在明显时空差

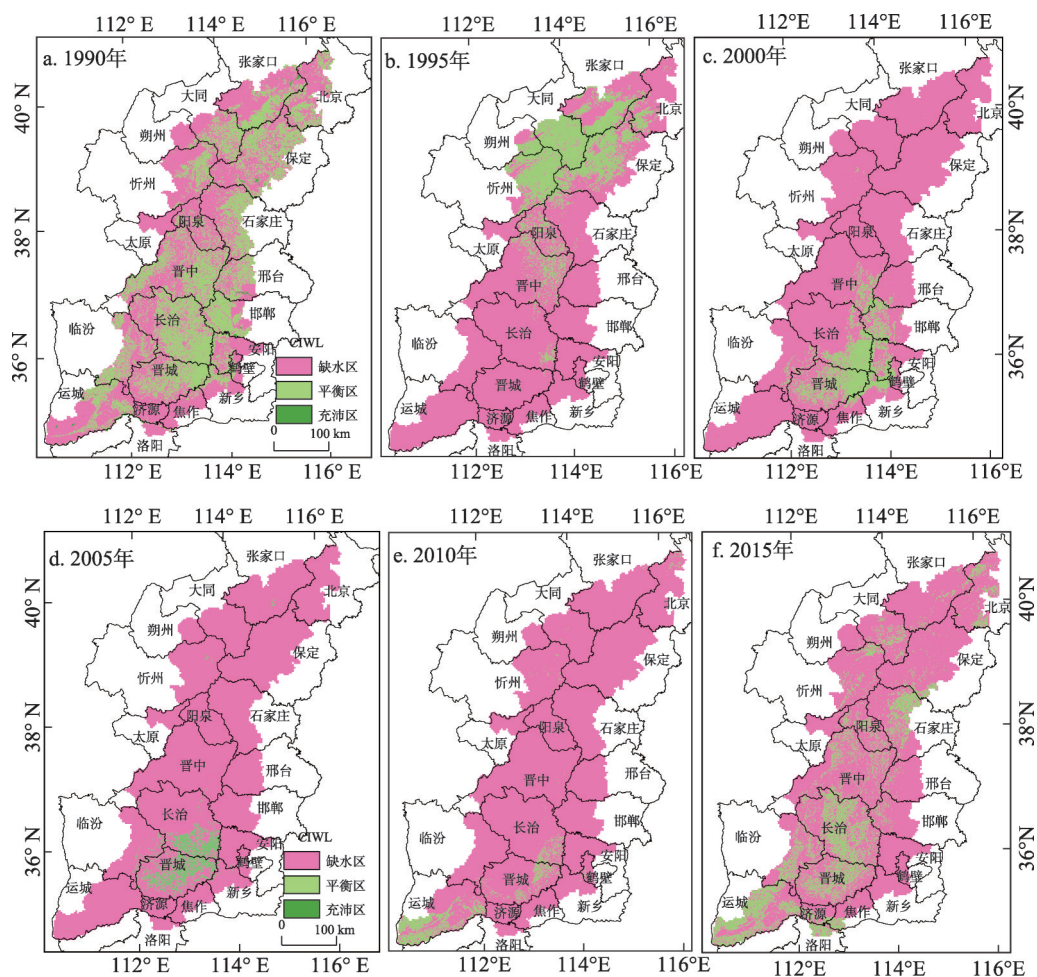


图2 1990-2015年太行山地水土要素耦合指数(CIWL)空间格局

Fig. 2 Spatial pattern of CIWL in Taihang Mountains region from 1990 to 2015

异。具体而言, 1990年缺水区和平衡区面积较均匀, 1995年北部以平衡区为主, 中南部以缺水区为主; 2000年和2005年南部以平衡区为主, 2010年平衡区分布面积明显减少, 仅分布在西南角; 2015年中部和南部以平衡区为主, 北部主要为缺水区。整体上太行山地水土要素耦合指数年际波动较大, 2015年水土要素耦合情形基本与1990年一致, 1995-2010年水土要素耦合指数高值区从北部向南部移动。

太行山地水土要素耦合指数垂直分异明显(图3)。从海拔变化来看, 1300 m以下其耦合指数年际变化呈“U”型, 1300 m以上2000年以后其耦合指数较为稳定; 从坡度变化来看, 5°以下其耦合指数年际变化呈“U”型, 5°以上其耦合指数2000年以后也趋于稳定。由此可见, 海拔1300 m和坡度5°是太行山地水土要素耦合指数分异的重要界线。

从生态功能亚区水土要素耦合指数对比来看(表2), 落叶阔叶林生态亚区耦合指数平均值较为一致, 介于0.70~0.72; 林农草复合生态亚区耦合指数均值较低, 平均值为0.69, 农业生态亚区中豫西北生态亚区耦合指数最低。标准差表明, 永定河上游山间盆地林农草复合生态亚区耦合指数波动最大, 敏感性最强, 受环境变化影响明显。

3.1.2 横断山地水土要素耦合时空特征 1990-2015年横断山地水土要素耦合指数以平衡

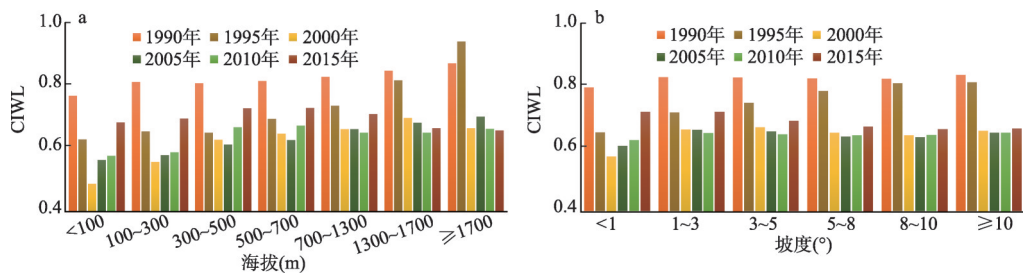


图3 1990-2015年太行山地水土要素耦合指数(CIWL)垂直变化
Fig. 3 Vertical changes of CIWL in Taihang Mountains region from 1990 to 2015

表2 1990-2015年太行山地生态功能亚区水土要素耦合指数(CIWL)

Tab. 2 The CIWL of ecological functional sub-region in Taihang Mountains region from 1990 to 2015

太行山地生态功能亚区	1990年	1995年	2000年	2005年	2010年	2015年	平均值	标准差
永定河上游山间盆地林农草复合生态亚区	0.81	0.85	0.57	0.58	0.65	0.68	0.69	0.12
太行山地落叶阔叶林生态亚区	0.84	0.80	0.66	0.62	0.63	0.68	0.71	0.09
太岳山地丘陵落叶阔叶林生态亚区	0.84	0.67	0.67	0.71	0.63	0.67	0.70	0.07
太行山太岳山间盆地丘陵农业生态亚区	0.91	0.69	0.74	0.81	0.70	0.83	0.78	0.09
豫西北太行山南麓丘陵农业生态亚区	0.79	0.53	0.68	0.68	0.66	0.71	0.67	0.09
中条山地丘陵落叶阔叶林生态亚区	0.78	0.55	0.67	0.73	0.76	0.82	0.72	0.10

区为主(图4), 缺水 区从西北向西南延伸, 充沛区主要分布在青藏高原东侧和云贵高原西南角。其中青藏高原东侧处于高原向平原过渡的斜面, 使龙泉山脉和邛崃山脉迎风坡降水量较大; 而西南角分布在贡山县和福贡县境内, 受印度洋季风气候和太平洋季风气候的双重影响, 降雨丰富, 介于1440~4700 mm, 空气湿度90%以上, 加之怒江、独龙江纵贯境内, 水资源充沛。1990-2015年充沛区范围逐渐缩小, 面积占比从8%减少至0。从缺水 区分布来看, 1990-2000年主要分布在横断山地的西侧和云贵高原的干热河谷地区, 2005-2015年缺水 区范围逐渐扩大, 面积占比从15%增加至45%, 如楚雄市受2010年云南遭遇百年一遇的特大干旱影响, 受灾尤为严重, 造成20余万农村人口缺水, 表明该区域近年来受气候变化和异常干旱的影响加剧^[33]。

横断山地水土要素耦合垂直差异也很明显(图5)。从海拔变化来看, 1800~3400 m其耦合指数最高, 1800 m以下2000年其耦合指数随海拔上升逐渐增高, 其他各年份其耦合指数随海拔上升逐渐降低, 3400 m以上其耦合指数呈下降趋势。从坡度变化来看, 1990-2015年水土要素耦合指数均值随坡度上升呈增加特征。

从生态功能亚区水土要素耦合指数平均值对比来看(表3), 川西南山地生态亚区、滇西横断山生态亚区耦合指数较高, 主要受年降水量“东南和西南多而中间少, 南部多而北部少”的分布特征影响^[34]。此外, 岷山—邛崃云—高山草甸—常绿阔叶林生态亚区耦合指数也较高, 该区域位于横断山地向成都平原的过渡带, 降水条件相对较好。从生态亚区植被类型对比看, 森林生态亚区其耦合指数(1.2)>林草复合生态亚区(1.0)>草原生态亚区(0.98), 1990-2010年各生态功能亚区均处于平衡区, 2015年沙鲁里山南部生态亚区、大雪山—念他翁山生态亚区处于缺水 区; 1990-2015年滇西横断山生态亚区水土要素耦合年际波动大, 对气候变化最敏感, 而长江源生态亚区、川西南生态亚区、滇中高原盆谷、金沙江下游亚区其耦合指数年际较为稳定。

3.1.3 黔桂喀斯特山地水土要素耦合时空特征 由图6可知, 1990-2015年黔桂喀斯特山

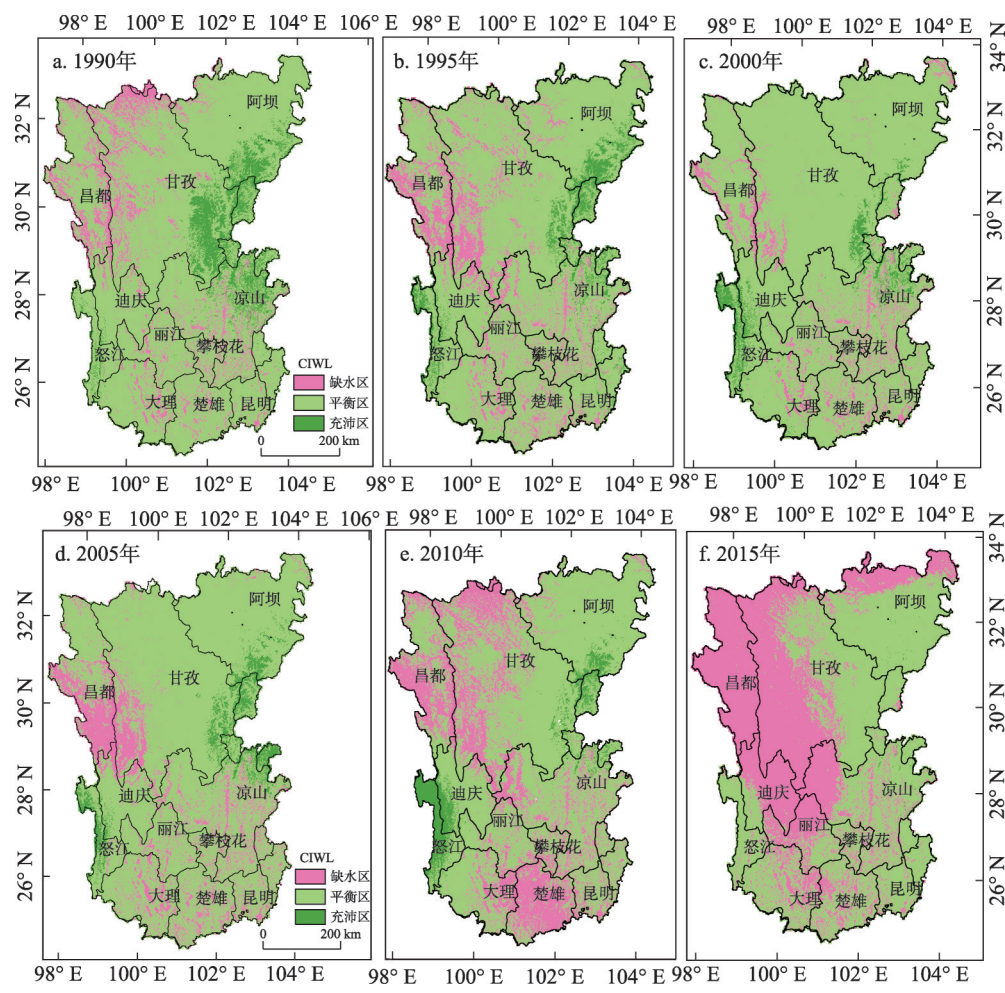


图4 1990-2015年横断山地水土要素耦合指数(CIWL)时空变化

Fig. 4 Spatial pattern of coupling of CIWL in Hengduan Mountains region from 1990 to 2015

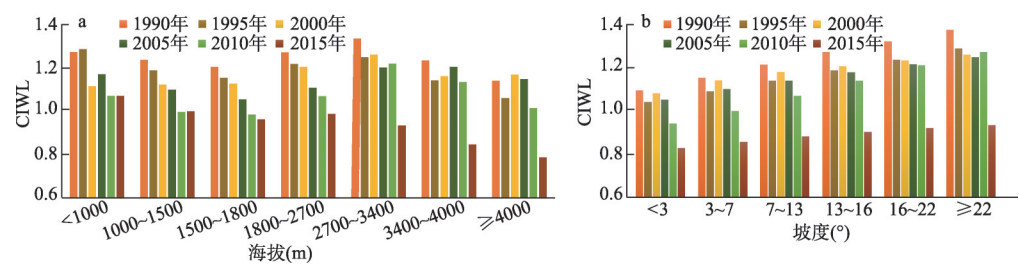


图5 1990-2015年横断山地水土要素耦合指数(CIWL)垂直变化

Fig. 5 Vertical changes of CIWL in Hengduan Mountains region from 1990 to 2015

地水土要素耦合指数表征的3种类型空间变化很大,其中充沛区逐渐减少,2005年最少,面积占比仅为17%,而至2015年快速恢复且超过了1990年,面积占比达56%。

总体上看,河池地区1990-2015年水土要素耦合指数基本处于充沛状态,仅1995年和2005年其耦合指数的充沛状态表现出空间收缩,2015年充沛区向南北扩张很大。缺水

表3 1990-2015年横断山地生态功能亚区水土要素耦合指数(CIWL)

Tab. 3 The CIWL of ecological functional sub-region in Hengduan Mountains region from 1990 to 2015

横断山地生态亚区	1990年	1995年	2000年	2005年	2010年	2015年	平均值	标准差
滇中高原盆地滇青冈—元江栲林—云南松林生态亚区	1.13	1.08	1.09	0.96	0.83	0.94	1.00	0.11
金沙江下游干热河谷常绿灌丛—稀树草原生态亚区	1.20	1.15	1.11	1.03	0.91	0.98	1.06	0.11
滇西横断山半湿润常绿阔叶林生态亚区	1.31	1.31	1.45	1.26	1.45	0.88	1.28	0.21
川西南山地偏干性常绿阔叶林生态亚区	1.53	1.41	1.39	1.34	1.25	1.21	1.35	0.11
沙鲁里山南部亚高山半干旱、半湿润暗针叶林生态亚区	1.40	1.13	1.26	1.14	1.04	0.81	1.13	0.20
大雪山—念他翁山—高山灌丛—高山草甸生态亚	1.08	0.99	1.11	1.04	0.97	0.69	0.98	0.15
峨山—邛崃山—高山草甸—常绿阔叶林生态亚区	1.56	1.46	1.24	1.46	1.40	1.12	1.37	0.16
长江源高寒草甸草原生态亚区	0.93	0.95	1.06	1.17	0.89	0.87	0.98	0.11

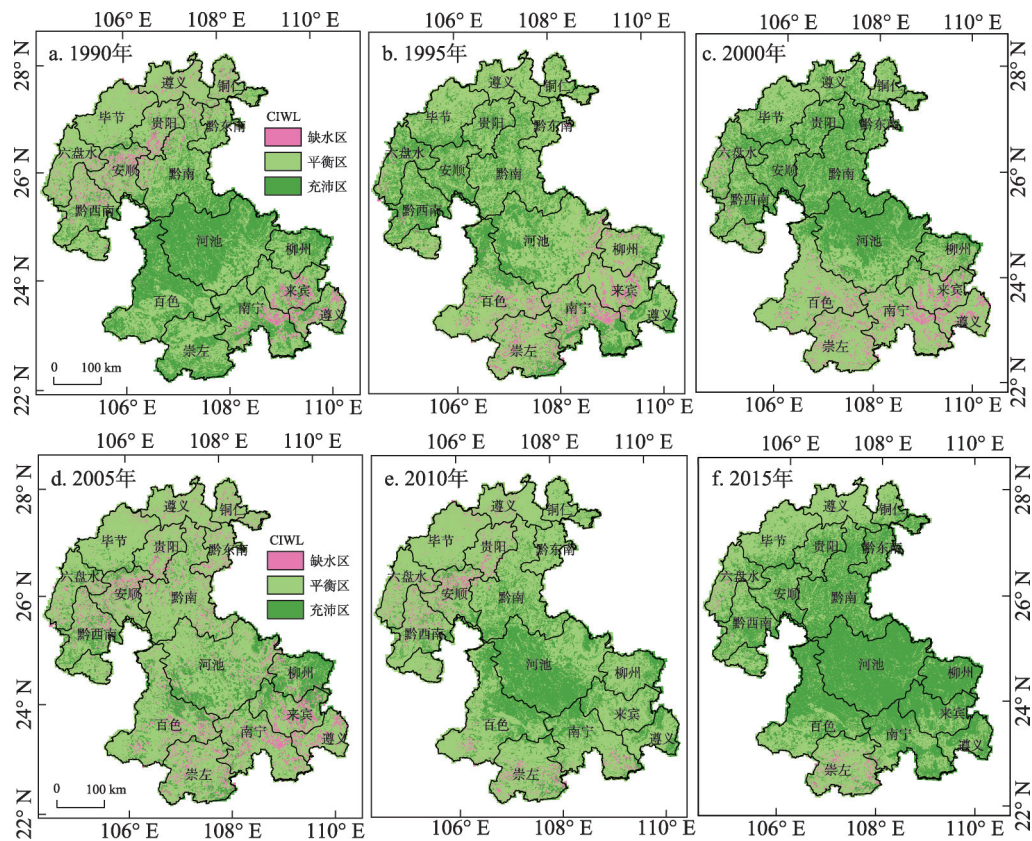


图6 1990-2015年黔桂喀斯特山地水土要素耦合指数(CIWL)空间分布

Fig. 6 Spatial pattern of CIWL in Guizhou-Guangxi karst mountains region from 1990 to 2015

区时空差异很大，主要在西北和东南断续分布，2000年和2005年水土要素耦合指数表征缺水面积在东南扩大，2010年在西北表征突出。原因在于2005年7-12月大部地区降水量比常年同期偏少3成，偏少程度居1951年以来同期第3位，致使干旱比常年同期偏重。2010年贵州省中部以西以南地区遭遇百年一遇严重干旱，造成近500万人、200余万头大牲畜发生临时饮水困难，同时60%的农作物受旱灾影响。整体上表明气候变化导致的异常天气过程促使水土要素耦合时空震荡性变化明显。

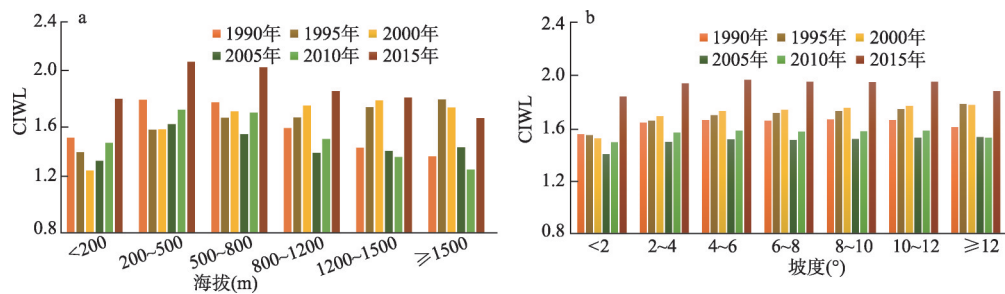


图7 1990-2015年黔桂喀斯特山地水土要素耦合指数(CIWL)空间分布
Fig. 7 Vertical changes of CIWL in Qian-Gui Karst mountains region from 1990 to 2015

1990-2015年黔桂喀斯特山地水土要素耦合指数垂直变化存在“U”型特征(图7)。从海拔变化来看,1990年、2005年、2010年、2015年其耦合指数均值在500 m以下随海拔上升而增加,500 m以上其耦合指数降低;1995年其耦合指数随海拔上升而增加,2000年其耦合指数在1500 m以下随海拔上升而增加,1500 m以上其逐渐下降。从坡度变化来看,整体上其耦合指数在12°以下随坡度上升而增加,平均值从1.56增至1.71,12°以上其耦合指数开始下降,平均值为1.69。可见黔桂喀斯特山地水土要素耦合指数在海拔500 m、1500 m,坡度12°发生明显变化。

1990-2015年黔桂喀斯特山地大部分生态功能亚区位于平衡区,只有少部分亚区处于充沛区(表4)。从水土要素耦合指数平均值来看,桂中北喀斯特生态亚区其耦合指数最高,平均值为1.86;黔西北中山生态亚区、桂东粤西丘陵山地生态亚区、桂西南喀斯特生态亚区,其耦合指数较低。从标准差来看,大部分生态亚区年际波动较大,特别是桂中北喀斯特生态亚区、黔西北中山生态亚区、桂东粤西丘陵山地生态亚区波动最强。

表4 1990-2015年黔桂喀斯特山地生态功能亚区水土要素耦合指数(CIWL)

Tab. 4 The CIWL of ecological functional sub-region in Guizhou-Guangxi karst mountains region from 1990 to 2015								
黔桂喀斯特山地生态亚区	1990年	1995年	2000年	2005年	2010年	2015年	平均值	标准差
黔中丘原盆地山原中山常绿阔叶林生态亚区	1.34	1.66	1.77	1.29	1.28	1.75	1.52	0.23
黔西北中山针阔混交林生态亚区	1.27	1.78	1.75	1.36	1.18	1.60	1.49	0.25
黔南山地盆地常绿阔叶林生态亚区	1.67	1.73	1.94	1.42	1.61	2.00	1.73	0.22
乌蒙山山地云南松林—羊草草甸生态亚区	1.40	1.78	1.67	1.49	1.36	1.65	1.56	0.17
桂中北喀斯特常绿、落叶阔叶混交林生态亚区	1.86	1.62	1.88	1.68	1.77	2.33	1.86	0.26
桂东粤西丘陵山地湿润季风常绿阔叶林生态亚区	1.51	1.61	1.19	1.30	1.54	1.88	1.50	0.24
桂中喀斯特常绿、落叶阔叶混交林生态亚区	1.75	1.59	1.58	1.59	1.76	2.16	1.74	0.22
桂西南喀斯特北热带季雨林生态亚区	1.74	1.45	1.26	1.45	1.49	1.60	1.50	0.16

3.2 水土要素耦合指数的影响因素分析

3.2.1 影响因素探测 首先,在ArcGIS中将研究区划分为5 km×5 km格网,分别提取各影响因素的平均值,然后,采用分位数或自然断裂点聚类进行分级,使其离散化为类型变量。最后,采用地理探测器方法得到各影响因素的决定力值。结果显示,除太行山地土壤类型和2015年GDP没有通过显著性水平外,三大山地其余因子均通过了1%的显著性水平检验,表明水土耦合过程受多因子作用和影响。

因子探测用于测度各影响因子对水土要素耦合的解释程度大小,当q值越大,说明因变量和自变量之间一致性越强(表5~表7)。对各因子决定力平均值进行排序,得到主

要因子高低表现为：太行山地为相对湿润度指数（0.379）>太阳辐射（0.230）>土地利用类型（0.162）>海拔（0.118）；横断山表现为相对湿润度指数（0.698）>太阳辐射（0.488）>地貌类型（0.121）>人口（0.083）；黔桂喀斯特山地为相对湿润度（0.466）>土地利用类型（0.233）>太阳辐射（0.215）>海拔（0.183）。由此可知，三大山地水土要素耦合主导因子决定力在不同年份其内部具有一致性，外部具有差异性。整体上，地理探测结果表明三大山地水土要素耦合的时空特征是以气候变化为主导，并叠加了土地利用和地形效应等综合影响的结果。

表 5 1990-2015 年太行山水土要素耦合探测结果

Tab. 5 Detection results of CIWL in Taihang Mountains region from 1990 to 2015

年份	海拔	坡度	地貌类型	地形位指数	土壤类型	年均气温	相对湿润度指数	太阳辐射	土地利用类型	人口	GDP
1990 年	0.028	0.039	0.064	0.040	<u>0.033</u>	0.017	0.159	0.070	0.144	0.040	0.021
1995 年	0.265	0.192	0.189	0.267	<u>0.094</u>	0.438	0.639	0.276	0.223	0.183	0.100
2000 年	0.152	0.103	0.145	0.150	<u>0.062</u>	0.035	0.340	0.303	0.124	0.054	0.075
2005 年	0.114	0.059	0.062	0.081	<u>0.030</u>	0.011	0.637	0.355	0.121	0.028	0.019
2010 年	0.103	0.015	0.058	0.052	<u>0.011</u>	0.017	0.413	0.234	0.097	0.040	0.032
2015 年	0.048	0.057	0.117	0.051	<u>0.012</u>	0.051	0.084	0.144	0.264	0.044	<u>0.008</u>
平均值	0.118	0.078	0.106	0.107	0.040	0.095	0.379	0.230	0.162	0.065	0.043

注：数字带“—”表示没有通过 5% 的显著性水平检验，加粗数字表示同一年份决定力较大。

表 6 1990-2015 年横断山水土要素耦合探测结果

Tab. 6 Detection results of CIWL in Hengduan Mountains region from 1990 to 2015

年份	海拔	坡度	地貌类型	地形位指数	土壤类型	年均气温	相对湿润度指数	太阳辐射	土地利用类型	人口	GDP
1990 年	0.078	0.092	0.153	0.030	0.070	0.040	0.717	0.533	0.064	0.094	0.004
1995 年	0.086	0.081	0.053	0.019	0.068	0.030	0.831	0.487	0.048	0.066	0.002
2000 年	0.042	0.066	0.147	0.043	0.094	0.044	0.638	0.379	0.061	0.077	0.007
2005 年	0.030	0.056	0.100	0.057	0.065	0.077	0.536	0.491	0.075	0.048	0.022
2010 年	0.071	0.126	0.127	0.079	0.087	0.070	0.806	0.555	0.046	0.048	0.036
2015 年	0.136	0.021	0.148	0.011	0.076	0.098	0.659	0.483	0.072	0.162	0.068
平均值	0.074	0.074	0.121	0.040	0.077	0.060	0.698	0.488	0.061	0.083	0.023

注：加粗数字表示同一年份决定力较大。

表 7 1990-2015 年黔桂喀斯特山区水土要素耦合探测结果

Tab. 7 Detection results of CIWL in Guizhou-Guangxi karst mountains region from 1990 to 2015

年份	海拔	坡度	地貌类型	地形位指数	土壤类型	年均气温	相对湿润度指数	太阳辐射	土地利用类型	人口	GDP
1990 年	0.212	0.039	0.088	0.066	0.080	0.072	0.553	0.221	0.247	0.320	0.073
1995 年	0.182	0.125	0.183	0.210	0.067	0.073	0.303	0.070	0.324	0.002	0.093
2000 年	0.267	0.179	0.199	0.308	0.033	0.173	0.333	0.390	0.223	0.037	0.043
2005 年	0.079	0.069	0.140	0.039	0.068	0.084	0.417	0.182	0.267	0.146	0.059
2010 年	0.248	0.026	0.063	0.092	0.058	0.100	0.584	0.140	0.175	0.117	0.051
2015 年	0.109	0.028	0.066	0.054	0.044	0.029	0.603	0.285	0.159	0.021	0.035
平均值	0.183	0.078	0.123	0.128	0.058	0.089	0.466	0.215	0.233	0.107	0.059

注：加粗数字表示同一年份决定力较大。

3.2.2 影响因素解析

(1) 相对湿润度指数、太阳辐射、年均气温是水土要素耦合的主导因子。IPCC 第五次报告指出, 全球变暖已成不争的事实, 全球气候变暖改变水循环, 导致降水量时空变化, 对水土要素耦合产生深刻的影响^[35]。三大山地横跨 20 个经度, 南北跨 16 个纬度, 涵盖了热带、亚热带、温带、高寒气候, 不同温度带水热条件差异巨大, 进而影响水土要素耦合程度。气候干湿的核心是地表水分盈亏及收支平衡的变化, 相对湿润度指数是以自然水分收支平衡为基础的干旱评估指标, 能较客观地反映某一地区的水热平衡状况, 是判断某一地区气候干旱与湿润状况的良好指标。由于太阳辐射是自然界中获得能量的主要来源, 是天气和气候特征及其变化的基础, 也是维持地球气候系统及生态系统能量平衡的重要因子^[36]。从三大山地相对湿润度指数均值来看, 太行山地、横断山地、黔桂喀斯特山地分别为 0.379、0.698、0.466, 太阳辐射指数均值分别为 0.230、0.488、0.215。从相对湿润度指数的时空分布来看, 太行山地和黔桂喀斯特山地高值区分布在中部, 横断山地高值区分布在毗邻成都平原一侧, 相对湿润度指数同水土要素耦合指数高度吻合。与此同时, 三大山地太阳辐射和年平均气温同水土要素耦合指数空间分布相反; 太阳辐射越强、年平均气温越高, 导致蒸发量越强烈, 年有效降水量越少。整体上, 气候因子主导着三大山地水土要素耦合指数的时空变化, 其中相对湿润度指数决定力大于太阳辐射和年平均气温。

(2) 地形与土地利用类型是水土要素耦合的协同因子。地形主要通过影响水汽输送、辐合汇聚和垂直运动来影响降水强度和分布^[37]。从三大山地地形因子的平均决定力来看, 太行山地、横断山地、黔桂喀斯特山地海拔决定力分别为 0.118、0.074、0.183, 地貌类型的决定力分别为 0.106、0.121、0.123, 地形位指数决定力分别为 0.107、0.040、0.128。三大山地地形复杂, 河谷、丘陵、山地、高原交错分布, 立体地形条件塑造了立体的气候和生态景观, 地势平缓迎风坡热量和水汽堆积, 降水丰富, 印证了地形是影响降水的重要因子。此外, 三大山地上土地利用类型 90% 以为生态空间和农业生产空间, 而有效供水量主要来源于天然降水, 所以土地利用类型是水土要素耦合的协同因子。

(3) 人口和 GDP 是影响水土要素耦合的一般因子。太行山地、横断山地、黔桂喀斯特山地生活空间和工矿业生产空间面积占比有较大差异, 分别为 8.9%、0.35%、1.7%, 因此, 太行山地 (0.162) 和黔桂喀斯特山地 (0.233) 土地利用类型影响力高于横断山地 (0.061)。但是人类活动对水土要素耦合的影响主要是通过改变下垫面情况和温室气体排放, 从而影响区域降水的水文要素^[34]。例如 2015 年三大山地耕地面积占总面积比重分别为 37.75%、7.7%、13.15%, 其人口密度分别为 310 人/km²、43 人/km²、206 人/km², 大量的坡耕地会引发水土流失, 局部有加剧生态退化趋势。

4 结论与讨论

4.1 结论

本文通过构建水土要素耦合公式, 并融合多属性数据的地理计算, 借助地理探测器对成因进行分析, 揭示了 1990-2015 年中国三大典型山地水土要素耦合的时空特征及其影响因子。主要结论如下:

(1) 三大山地水土要素耦合空间差异十分显著。太行山地以缺水区为主, 横断山地和黔桂喀斯特山地以平衡区为主, 并有充沛区分布, 但横断山地其耦合指数呈显著减少趋势, 凸显气候变化的重要影响。2015 年三大山地水土要素耦合发生很大变化, 太行山

地平衡区范围扩大,横断山地缺水范围扩大,黔桂喀斯特山地充沛区范围扩大。从垂直分异来看,三大山地分别在 1300 m、1800~3400 m、500~1500 m 其耦合指数发生变异,主要受季风气候和地形影响,导致迎风坡年降水量高,同时退耕还林和生态建设增加了地表绿被,改善了下垫面,促进了水源涵养,提高了水土要素耦合效应。

(2) 三大山地生态功能亚区水土要素耦合指数内部分异明显。整体表现为森林生态亚区>林草复合生态亚区>农业生态亚区,三大山地偏北地区其耦合指数波动最大,对气候敏感性最强,使得生态功能亚区其耦合指数具有明显的地域差异性。

(3) 三大山地水土要素耦合的空间异质性是自然要素和人文要素综合作用的结果。其中,相对湿度指数(0.51)和太阳辐射(0.31)为主导因子,地貌类型(0.12)和土地利用类型(0.15)为协同因子,人口(0.08)和GDP(0.04)为一般因子。总体上,三大山地水土要素耦合的时空特征是以气候变化为主导,人类活动是通过作用于土地利用而叠加在自然过程中,导致水土要素耦合过程变得复杂和差异明显。

4.2 讨论

气候和其他环境变化如何影响人与环境耦合系统的脆弱性?这是未来地理学需要关注的战略问题^[37],而“水、土资源可持续利用与食物供给安全”更是中国地理应该关注的综合性大问题^[38]。山地水土要素耦合情景是陆地表层过程的重要表征,其耦合程度决定了水土资源利用效率,并直接影响自然生态系统格局及过程,特别是对农业生产系统功能的稳定性和可持续性的影响,成为山区土地利用和人地关系协调的重要依据。由于山地是以生态空间和农业生产空间占据主导,其功能的正常发挥主要依赖于天然降水的维系,所以,本研究的单元为公里格网,主要考虑生态空间和农业生产空间的水资源有效供给量和土地利用的需求量,分析了三大山地水土要素耦合的基本特征和变化趋势。研究表明,三大山地水土要素耦合差异的显著性,与其地理位置、气候类型、国土开发方式密切相关,充分体现了地理综合体复杂特征。因此,需要考虑气候变化趋势与局地响应特征,基于水土要素时空耦合变化规律,探究山区国土空间开发适应策略与路径,以强化适应气候变化和应对能力的建设,破解山区国土空间优化中的制约问题。值得注意的是,今后研究中需要从流域降尺度上解析水土要素耦合时空过程、格局与效应,应加强季节性资源型缺水、工程型缺水、水质型缺水等造成的水土要素耦合偏离问题对山区经济社会发展的影响研究,从而为建立山区可持续发展的多目标水资源保障和水安全提供科学依据。

参考文献(References)

- [1] Feng Zhiming, Yang Yanzhao, You Zhen, et al. Research on the suitability of population distribution at the county level in China. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(6): 723-737. [封志明, 杨艳昭, 游珍, 等. 基于分县尺度的中国人口分布适宜度研究. *地理学报*, 2014, 69(6): 723-737.]
- [2] Wen Qian, Meng Tianxing, Yun Yuhan. Temporal and spatial variation and match pattern of agricultural land and water resources in Henan province. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(5): 233-239. [文倩, 孟天醒, 鄢雨旱. 河南省农业水土资源时空分异与匹配格局. *水土保持研究*, 2017, 24(5): 233-239.]
- [3] Deng Wei, Tang Wei. General directions and countermeasures for urbanization development in mountain areas of China. *Journal of Mountain Science*, 2013, 31(2): 168-173. [邓伟, 唐伟. 试论中国山区城镇化方向选择及对策. *山地学报*, 2013, 31(2): 168-173.]
- [4] Deng Wei, Dai Erfu, Jia Yangwen, et al. Spatiotemporal coupling characteristics, effects and their regulation of water and soil elements in mountainous area. *Journal of Mountain Science*, 2015, 33(5): 513-520. [邓伟, 戴尔阜, 贾仰文, 等. 山地水土要素时空耦合特征、效应及其调控. *山地学报*, 2015, 33(5): 513-520.]
- [5] Liu Yansui, Gan Hong, Zhang Fugang. Analysis of the matching patterns of land and water resources in Northeast China. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(8): 847-854. [刘彦随, 甘红, 张富刚. 中国东北地区农业水土资源匹配格

- 局. 地理学报, 2006, 61(8): 847-854.]
- [6] Zhang Zhanyu, Si Han, Feng Baoping, et al. An optimal model for agriculture water and soil resources configuration in water shortage irrigation area. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 45(4): 403-409. [张展羽, 司涵, 冯宝平, 等. 缺水灌区农业水土资源优化配置模型. 水利学报, 2014, 45(4): 403-409.]
- [7] Dong Wen, Yang Yu, Zhang Yufang. Coupling effect and spatiotemporal differentiation between oasis city development and water-land resources. *Resources Science*, 2013, 35(7): 1355-1362. [董雯, 杨宇, 张豫芳. 绿洲城镇发展与水土资源开发的耦合效应及其时空分异. 资源科学, 2013, 35(7): 1355-1362.]
- [8] Ma Libang, Tian Yaya, Guo Xiaodong, et al. Spatial-temporal change of rural settlements and its spatial coupling relationship with water and soil resources based on grid in the Hexi Oasis. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(5): 775-787. [马利邦, 田亚亚, 郭晓东, 等. 基于格网的河西绿洲乡村聚落时空演变及其与水土资源的空间耦合关系. 自然资源学报, 2018, 33(5): 775-787.]
- [9] Zhao Rongqin, Li Zhiping, Han Yuping, et al. The coupling interaction mechanism of regional water-land-energy-carbon system. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(9): 1613-1628. [赵荣钦, 李志萍, 韩宇平, 等. 区域“水—土—能—碳”耦合作用机制分析. 地理学报, 2016, 71(9): 1613-1628.]
- [10] Rodriguez R G, Scanlon B R, King C W, et al. Biofuel-water-land nexus in the last agricultural frontier region of the Brazilian Cerrado. *Applied Energy*, 2018, 231: 1330-1345.
- [11] Ibarrola-Rivas M J, Granados-Ramirez R, Nonhebel S. Is the available cropland and water enough for food demand? A global perspective of the land-water-food nexus. *Advances in Water Resources*, 2017, 110: 476-483.
- [12] Zhao R, Liu Y, Tian M, et al. Impacts of water and land resources exploitation on agricultural carbon emissions: The water-land-energy-carbon nexus. *Land Use Policy*, 2018, 72: 480-492.
- [13] Jiang Qiuxiang, Zhou Zhimei, Wang Zilong, et al. Risk assessment and optimization of water resources shortage based on water and land resources coupling. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(12): 136-143. [姜秋香, 周智美, 王子龙, 等. 基于水土资源耦合的水资源短缺风险评价及优化. 农业工程学报, 2017, 33(12): 136-143.]
- [14] Wang Lixia, Ren Zhiyuan, Ren Zhaoxia, et al. Integrated allocation of water and land resources based on GLP model in Yanhe watershed. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(4): 48-53. [王丽霞, 任志远, 任朝霞, 等. 陕北延河流域基于GLP模型的流域水土资源综合配置. 农业工程学报, 2011, 27(4): 48-53.]
- [15] Das B, Singh A, Panda S N, et al. Optimal land and water resources allocation policies for sustainable irrigated agriculture. *Land Use Policy*, 2015, 42(42): 527-537.
- [16] Mosleh Z, Salehi M H, Fasakhodi A A, et al. Sustainable allocation of agricultural lands and water resources using suitability analysis and mathematical multi-objective programming. *Geoderma*, 2017, 303: 52-59.
- [17] Wang Lucang, Gao Jing. Spatial coupling relationship between settlement and land and water resources based on irrigation scale: A case study of Zhangye city. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(11): 1888-1901. [王录仓, 高静. 基于灌区尺度的聚落与水土资源空间耦合关系研究: 以张掖绿洲为例. 自然资源学报, 2014, 29(11): 1888-1901.]
- [18] Shi Peili, Geng Shoubao. Effects of soil and water interaction and optimal allocation of land use in mountainous areas. *Chinese Journal of Nature*, 2018, 40(1): 25-32. [石培礼, 耿守保. 山地水土要素耦合效应及土地利用的优化配置. 自然杂志, 2018, 40(1): 25-32.]
- [19] Liu Bintao, Zhang Su, Xiong Donghong, et al. The spatiotemporal distribution and coupled characteris in the Hengduan Mountains, China. *Chinese Journal of Nature*, 2018, 40(1): 55-63. [刘斌涛, 张素, 熊东红, 等. 横断山地水土要素时空分布格局与耦合特征. 自然杂志, 2018, 40(1): 55-63.]
- [20] 中华人民共和国生态环境部. 关于印发《生态保护红线划定指南》的通知. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201707/t20170728_418679.htm, 2017.
- [21] Wang Bing, Guo Quanshui, Yan Hong, et al. The potential impact of climate change on the rainfall interception of forest in China. *Scientia Silvae Sinicae*, 1997, 33(4): 299-306. [王兵, 郭泉水, 阎洪, 等. 气候变化对我国森林降水截留规律的可能影响. 林业科学, 1997, 33(4): 299-306.]
- [22] Zhang Yuan, Zhang Zhifeng. Minimum ecological water requirement of forestland in Huang-huai-hai area. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(2): 72-75. [张远, 杨志峰. 黄淮海地区林地最小生态需水量研究. 水土保持学报, 2002, 16(2): 72-75.]
- [23] Li Shuangshuang, Yang Shaini, Liu Xianfeng. Spatiotemporal variability of rice water deficiency during 1960-2013 and its influencing factors in southwestern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(18): 5798-5808. [李双双, 杨赛霓, 刘宪

- 锋. 西南地区水稻水分亏缺率时空变化特征及其影响因素. 生态学报, 2016, 36(18): 5798-5808.]
- [24] Wang Xiaoying, Liang Wenju, Wen Dazhong. Analysis of paddy field evapotranspiration in North China and calculation of crop coefficient. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(1): 69-72. [王笑影, 梁文举, 闻大中. 北方稻田蒸散需水分析及其作物系数确定. 应用生态学报, 2005, 16(1): 69-72.]
- [25] Pang Yanmei, Chen Chao, Pan Xuebiao. Variation characteristics of maize effective precipitation and water requirement in Sichuan basin during 1961-2010. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(Supp.1): 133-141. [庞艳梅, 陈超, 潘学标. 1961-2010年四川盆地玉米有效降水 and 需水量的变化特征. 农业工程学报, 2015, 31(s1): 133-141.]
- [26] Luo Hongying, Cui Yuanlai. The computation and analysis of highland barley crop coefficient in the main agricultural area of Tibet. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33(1): 116-119. [罗红英, 崔远来. 西藏主要农区青稞作物系数的计算分析. 灌溉排水学报, 2014, 33(1): 116-119.]
- [27] Huang Kai. Water demand of sugarcane and technologies of drip irrigation on hill slopes in Guangxi, China [D]. Nanning: Guangxi University, 2016. [黄凯. 广西丘陵坡地糖料蔗耗水规律及滴灌研究[D]. 南宁: 广西大学, 2016.]
- [28] Gao Xiaoli, Xu Junzeng, Yang Shihong, et al. Water requirement pattern and crop coefficient of main crops in Guizhou Province. China Rural Water and Hydropower, 2015(1): 11-14. [高晓丽, 徐俊增, 杨士红, 等. 贵州地区主要作物需水规律与作物系数的研究. 中国农村水利水电, 2015(1): 11-14.]
- [29] Cao Yongqiang, Zhu Mingming, Li Weiwei. Effective precipitation and water requirements of crops in Hebei Province over 60 years. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(2): 560-570. [曹永强, 朱明明, 李维佳. 河北省典型区主要作物有效降雨量和需水量特征. 生态学报, 2018, 38(2): 560-570.]
- [30] Zhou Yingping, Hu Zhenghua, Cui Hailing, et al. Effect of climate change on main crop water requirements in Henan province during 1971-2010. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology: Natural Science Edition, 2013, 5(6): 515-521. [周迎平, 胡正华, 崔海玲, 等. 1971-2010年气候变化对河南省主要作物需水量的影响. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2013, 5(6): 515-521.]
- [31] Wang Gailing, Wang Qingchu, Shi Shengxin. Vegetation's ecological water requirement in Yongding River watershed in Shanxi province. Journal of Natural Resources, 2013, 28(10): 1743-1753. [王改玲, 王青杵, 石生新. 山西省永定河流域林草植被生态需水研究. 自然资源学报, 2013, 28(10): 1743-1753.]
- [32] Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134. [王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.]
- [33] Xu Fei, Jia Yangwen, Niu Cunwen, et al. Variation character of annual, seasonal and monthly temperature and precipitation. Mountain Research, 2018, 36(2): 171-183. [徐飞, 贾仰文, 牛存稳, 等. 横断山区气温和降水年季月变化特征. 山地学报, 2018, 36(2): 171-183.]
- [34] Zhang Rongzu, Zheng Du, Yang Qinye, et al. Physical Geography of Hengduan Mountains. Beijing: Science Press, 1996. [张荣祖, 郑度, 杨勤业, 等. 横断山区自然地理. 北京: 科学出版社, 1996.]
- [35] Wang Ying, Cao Mingkui, Tao Bo, et al. The characteristics of spatio-temporal patterns in precipitation in China under the background of global climate change. Geographical Research, 2006, 25(6): 1031-1040. [王英, 曹明奎, 陶波, 等. 全球气候变化背景下中国降水量空间格局的变化特征. 地理研究, 2006, 25(6): 1031-1040.]
- [36] Zha Liangsong. A study on spatilal and temporal variation of solar radiation in China. Scientia Geographica Sinica, 1996, 16(3): 232-237. [查良松. 我国地面太阳辐射量的时空变化研究. 地理科学, 1996, 16(3): 232-237.]
- [37] National Academy of Sciences, United States. Understanding the Changing Planet Strategic: Directions for the Geographical Sciences. Liu Yi, Liu Weidong, et al. trans. Beijing: Science Press, 2011: 46-55. [美国国家科学院研究理事会. 刘毅, 刘卫东, 等. 译. 理解正在变化的星球: 地理科学的战略方向. 北京: 科学出版社, 2011: 46-55.]
- [38] Fu Bojie, Leng Shuying, Song Changqing. The characteristics and tasks of geography in the new era. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(8): 939-945. [傅伯杰, 冷疏影, 宋长青. 新时期地理学的特征与任务. 地理科学, 2015, 35(8): 939-945.]

Spatio-temporal coupling characteristic of water-land elements and its cause in typical mountains

ZHOU Peng^{1,3}, DENG Wei^{1,2,3}, PENG Li^{1,2}, ZHANG Shaoyao^{1,3}

(1. Research Center for Mountain Development, Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China; 2. College of Geography and Resources Science, Sichuan Normal University, Chengdu 610101, China; 3. College of Resources and Environment, CAS, Beijing 100049, China)

Abstract: Water and land resources are the foundation for human wellbeing. The coupling of water-land elements in mountainous areas is closely related to the functionality of production-living-ecology space, whose coupling process and features are closely related to ecosystem services and sustainable socio-economic development in mountainous areas. Through constructing a more scientific coupling index of water-land elements (CIWL), the present study conducted a large-scale and long-term analysis of the coupling characteristics of the Taihang Mountains, Hengduan Mountains and Guizhou- Guangxi karst mountains. The influencing factors of the coupling index in each period were analyzed by employing geodetector method. The results show that: (1) The three mountainous areas are significantly different in spatial differences of coupling index of water-land elements. The Taihang Mountains are dominated by water deficiency, while the Hengduan Mountains are by the balanced area. The Guizhou-Guangxi mountainous areas are dominated by water deficiency and the abundant areas. (2) In terms of the vertical differentiation, the coupling of water-land elements of the three major mountainous areas varies at 1300 m, 1800-3400 m and 500-1500 m, respectively, with the coupling index of water-land elements in ecological functional sub-regions indicating that the forest ecological sub-region > forest grass ecological sub-region > agro-ecological sub-region. (3) Natural factors and human factors are responsible for spatial differentiation of coupling index, among which, the climate is a dominant driving factor, the topography and land use type are secondary, and the human factors are superimposed on the natural factors, jointly causing the complexity and variation of the coupling of water-land elements. The coupling index of water and land elements established in this paper has deepened the study of spatial-temporal processes of water and land interaction in mountainous areas, thereby providing a decision-making reference for coping with the sustainable development of mountainous areas in a changing environment.

Keywords: water and land elements; coupling characteristics; geodetector; spatial-temporal differentiation; typical mountains