

喀斯特峡谷区干旱灾害下的水资源工程性保障研究 ——以花江石漠化综合示范区顶坛小流域为例

于晨曦^{1,2}, 陈 汧^{1,2}, 熊康宁^{1,2}

(1. 贵州师范大学 中国南方喀斯特研究院, 贵阳 550001; 2. 贵州省喀斯特山地生态环境国家重点实验室培育基地, 贵阳 550001)

摘 要:选取贵州花江石漠化综合示范区顶坛小流域,采用 Palmer 干旱指数来确立旱度指标,分析降水量、蒸散量、径流量和土壤有效水分储存量来反映当地的水文情况,提供干旱信息,为干旱的规划、监测和预报提供依据。结果表明,示范区现有水利工程不够科学合理,水利设施不配套,应对干旱极端气候的工程性保障手段不足。干旱会加剧石漠化。根据花江峡谷区地表水资源丰富这一特点,用管路将现有水利工程进行优化配套,建立管网状微型水利系统,并对北盘江这一地表河流的水进行逐级抽提,通过石漠化综合治理工程的实施,减缓地方性工程性缺水,增进水利设施在干旱灾害下的应急调控能力,增进水资源在灾害下的可持续利用性。

关键词:干旱; Palmer 干旱指数; 水资源; 石漠化; 优化配套

中图分类号: S423; TV211

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2013)03-0305-05

Study on the Sustainable Utilization of Water Resources under the Drought Disaster in Karst Valley Area —A Case Study of Dingtian Watershed in the Huajiang Demonstration Zone

YU Chen-xi^{1,2}, CHEN-Hu^{1,2}, XIONG Kang-ning^{1,2}

(1. Institute of South China Karst, Guizhou Normal University,

Guiyang 550001, China; 2. State Key Laboratory Incubation Base for Karst

Mountain Ecology Environment of Guizhou Province, Guiyang 550001, China)

Abstract: The wide application of drought model into ecological restoration in drought season provide more reasonable foundation for water resource's exploration and management. In this article, choose Dingtian small watershed of Huajiang karst rocky desertification integrated management and demonstration area in Guizhou for example and establish drought indexes based on Palmer drought model. And also, the local hydrology condition factors including precipitation, evaporation, runoff volume and soil available water has been analysed, which provide drought information and basis for projecting, monitoring and forecasting. Results indicate that the present water conservancy projects are unreasonable and water conservancy facilities are unfit, which are not enough when extremely drought climate, meanwhile, drought climate will aggravate rocky desertification. According to surface water resource characters in Huajiang gorge areas, assembly optimize the present hydrology projects by use of pipeline, establish pipe-network micro irrigation systems and pump water from Beipan River step by step based on rocky desertification integrated management, which can relieve engineering water shortage. Consequently, enhancing emergency control ability of water conservancy facilities in drought disaster season can improve the usage of water resource forward.

Key words: drought; Palmer drought model index; water resources; karst rocky desertification; optimization matching

收稿日期: 2012-09-20

修回日期: 2012-11-20

资助项目: 喀斯特高原峡谷石漠化综合治理技术与示范(2011BAC09B01); 石漠化及其生态恢复的土壤动物群落效应研究(黔科合 J 字[2012]2281 号)

作者简介: 于晨曦(1986—), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 在读硕士, 主要从事喀斯特水资源开发利用研究。E-mail: yuchenxi@126.com

通信作者: 陈汧(1965—), 男, 贵州遵义人, 教授, 主要研究方向: 喀斯特石漠化生态恢复。E-mail: gy_chenhu@163.com

干旱已成为全球气候变化背景下典型的自然现象,其发生过程具有渐进性,且影响范围广^[1-3]。干旱问题涉及气象干旱、水文干旱、农业干旱与社会经济干旱等诸多方面,因此定义一个客观的能准确地反映干旱的指数比较困难。由于喀斯特地区独特的水文地貌结构及其功能效应,其流域空间结构、水系发育规律、水文动态等方面表现出与常态流域的巨大差异,其特殊性造成土壤保水能力差,且底下管道的存在致使漏水严重,增加了水利工程修建的难度。所选研究区由于下垫面构造的特殊性,模型区域适应能力差,移植难度高,没有大家公认的可供参考和使用的干旱预测模型。而研究成熟的大尺度干旱观测资料和实验资料在向小流域尺度推广中会出现很多问题,也即是“尺度效应”。干旱是水分持续亏缺的结果,Palmer定义的干旱系数是以桑斯威特的可能蒸发的概念为基础,干旱强度是水分亏缺和持续时间的函数;水分亏缺以本月降水量与本月气候适宜降水量之差的修正值来表示,而持续时间因子则以在前月旱度基础上累加的本月水分状况对旱度的贡献来体现。

西南喀斯特地区属于亚热带季风气候,土壤的质量和厚度受母岩性质、地形坡度、植被状况以及人类活动特别是土地利用状况等多种因素的影响^[4]。石漠化的出现是因为在特殊的地质地貌条件下,由于人口的膨胀和对自然资源的过度依赖,使得森林面积缩小,土层变薄造成水土流失,土壤含水量下降致使作物的保水和耐旱能力降低^[5]。由于喀斯特地区生态系统脆弱,易受外界因素干扰,需要建模对水资源利用进行评价^[6],因而合理估算水资源量及现有水利设施的优化配套,明确可利用水资源与干旱的关系^[7],对喀斯特地区的水利建设作出合理的评价具有重要意义。花江喀斯特峡谷区是典型的脆弱喀斯特生态系统,近几年随着人类活动对环境影响的加剧,植被遭到破坏,石漠化问题已引起政府的高度重视。

基于上述分析,本研究基于 Palmer 干旱指数模型来评价顶坛小流域 2009—2011 年的干旱程度^[8],构建干旱应急系统,对顶坛小流域土壤侵蚀和降水的总体特征及空间变化格局进行系统分析,定量、定位地分析影响土壤侵蚀变化的相关因素,论述人类活动对脆弱的喀斯特生态系统的影响。

1 研究区概况

顶坛小流域位于贵州贞丰县以北盘江镇花江峡谷中游,为典型喀斯特中山峡谷地貌,具有典型的干热河谷气候特点^[9]。流域内喀斯特面积 1 641.01 hm²,土地石漠化总面积为 726.63 hm²。轻度、中度、

强度石漠化面积分别为 464.09, 141.33, 121.21 hm²,分别占石漠化总面积的 63.89%, 19.49%, 16.66%。喀斯特作用广泛而强烈,不仅有大量的裂隙、漏斗、落水洞和深洼地,而且峡谷深切,坡度陡峭,地表水不断向地下水转化过程中形成大量地面干谷、溶沟以及石芽。土壤以石灰土为主,其结构不良、质地黏重、易旱。土地退化严重,土壤养分、肥力丢失,成为不宜耕作的强度石漠化区域^[10]。顶坛小流域冬春温暖干旱,夏秋湿热,热量资源丰富;年均温 18.4℃,年均极端最高气温为 32.4℃,年均极端最低气温为 6.6℃,年均降水量 1 248 mm,但时空分布不均,5—10 月降水占全年总降水量的 83%。小流域核心示范面积 697.75 hm²,辐射推广面积 25.35 km²。小流域内多山地且坡度大,最高海拔 1 373 m,最低海拔 445 m,相对高差达 928 m,垂直地带性分异明显。在低中山峡谷区,土地的生产效率低下,质量差且人地矛盾突出。

2 研究方法

2.1 Palmer 干旱指数计算方法

Palmer 干旱指数可以简称为 PDSI (Palmer Drought Severity Index)。它的计算可分为以下 6 个步骤:① 统计水文帐,由长期气象资料序列计算出月水分平衡各分量的实际值、可能值及平均值,包括蒸散量、潜在蒸散量、径流量、潜在径流量、补水量、潜在补水量、失水量和潜在失水量;② 计算各气候常数和系数,包括蒸散系数、补水系数、径流系数、失水系数和气候特征值;③ 计算出水分平衡各分量的气候适宜值,包括气候适宜蒸散量、气候适宜补水量、气候适宜径流量、气候适宜失水量和气候适宜降水量;④ 计算水分盈亏值 d 和水分异常指数 Z ;⑤ 计算 Palmer 干旱指数;⑥ 干期结束的度的计算,确立当前期的 Palmer 指数值。

2.2 Palmer 干旱指数的计算公式

PDSI 的原理是水分平衡方程,即在“当前情况下达到气候适宜”(Climatically Appropriate For Existing Conditions)的情况下,降水量等于蒸散量与径流量之和再加上土壤水分的交换量,表示如下:

$$\hat{P} = \hat{ET} + \hat{RO} + \hat{R} - \hat{L} \quad (1)$$

式中: \hat{ET} ——蒸散量; \hat{R} ——土壤水分供给量; \hat{PO} ——径流; \hat{L} ——土壤水分损失量。Palmer 指数假定土壤为上下两层模式,除非上层土壤中的水分全部丧失,下层土壤水分才开始失去,且下层土壤的水分不可能全部失去。可能蒸散量 PET 用 Thornthwaite 方法计算(计算 PET 的方法在 PDSI 程序中是

一个独立的部分,可以用其他方法代替)。在计算蒸散量、径流量、土壤水分交换量的可能值与实际值时,需要遵循一系列的规则和假定。另外,土壤有效持水量 AWC(Available Water Holding Capacity)也作为初始输入量。在计算 PDSI 过程的中,实际值与正常值相比的水分距平 d 表示为实际降水量与气候适宜条件下降水量的差:

$$d = P - \hat{P} \quad (2)$$

求得水分距平 d 后,又将其与指定地点给定月份的气候权重系数 K 相乘,得出 Palmer-Z 指数:

$$Z = dK \quad (3)$$

Z 被定义为水分异常指数,表示指定地点给定月份,实际气候干湿状况与其多年平均水分状态的偏离程度。其中气候权重系数 K 的计算公式如下:

$$K_i = \left(\frac{17.67}{\sum_{j=1}^{12} \bar{D}_j K_j'} \right) K_i' \quad (4)$$

$$K_i' = 1.5 \cdot \log_{10} \left[\frac{\text{PET}_i + R_i + \text{RO}_i}{P_i + L_i} + 2.8 \right] + 0.5 \quad (5)$$

$$ZE = \begin{cases} 3(0.5 - 0.897\text{PDSI}_{i-1}), & \text{当 } \text{PDSI}_{i-1} > 0.5 \\ 3(-0.5 - 0.897\text{PDSI}_{i-1}), & \text{当 } \text{PDSI}_{i-1} < -0.5 \end{cases} \quad (10)$$

这里认为大于 -0.15 的 Z 值对于结束干旱有效,定义有效增湿量 U_w :

$$U_w = Z + 0.15 \quad (11)$$

同理,定义有效增干量 U_d :

$$U_d = Z - 0.15 \quad (12)$$

将当前干(湿)期结束的概率 P_e 看作是得到(失去)的水分与确切地结束当前干(湿)期所需要得到(失去)的水分的百分比率。然而, P_e 的计算不能简单地用 U_w 或 U_d 与 ZE 相比,因为在一段比常年湿的趋势中可能会出现一个干月,由此带来一个负的 U_w ,因而设计一个有效增湿(干)累积量 V ,计算如下:

若使当前干期结束:

$$V_i = \begin{cases} V_{i-1} + U_w, & \text{如果 } -U_w < V_{i-1} \\ 0, & \text{如果 } -U_w \geq V_{i-1} \end{cases} \quad (13)$$

若使当前湿期结束:

$$V_i = \begin{cases} V_{i-1} + U_d, & \text{如果 } -U_d < V_{i-1} \\ 0, & \text{如果 } -U_d \geq V_{i-1} \end{cases} \quad (14)$$

则当前干(湿)期结束的概率 P_e 由下式得到:

$$P_e = \frac{V_i}{ZE + V_{i-1}} \times 100\% \quad (15)$$

在一个干期里,当 P_e 达到 100% 时,则开始一个回算过程,以此来决定 PDSI 值。需要注意的是,在前面计算 PDSI 值时,实际上设立了 3 个指数 X_1 、 X_2

其中, i 为第 i 个月, K 随着地点和月份而变化。 K 值确定后决定月 PDSI 值,计算公式如下:

$$\text{PDSI}_i = 0.897\text{PDSI}_{i-1} + \frac{1}{3}Z_i \quad (6)$$

公式(6)中的 0.897 和 $1/3$ 为持续因子,它们实际影响着 PDSI 对水分盈缺的灵敏度,起始月份的 PDSI 计算公式为:

$$\text{PDSI}_i = \frac{1}{3}Z_i \quad (7)$$

在得到上述的统计经验计算公式之后,利用当前干(湿)期结束概率(P_e)来决定实际的 PDSI 值。它的意义是计算需要得到(失去)多少水分才能使当前干(湿)期回到正常状态(即 PDSI 值在 -0.5 和 0.5 之间),设需要得到(失去)的水分为 ZE ,则有

$$0.5 = 0.897\text{PDSI}_{i-1} + \frac{1}{3}ZE, \text{当 } \text{PDSI}_{i-1} > 0.5 \quad (8)$$

$$-0.5 = 0.897\text{PDSI}_{i-1} + \frac{1}{3}ZE, \text{当 } \text{PDSI}_{i-1} < -0.5 \quad (9)$$

由此可以得到 ZE

和 X_3 来分别进行统计,3 个指数的值都是按照式(15)来计算的, X_1 为初始湿期的 PDSI 值, X_2 为初始干期的 PDSI 值, X_3 为当前确立干(湿)期的 PDSI 值,实际的 PDSI 值则是根据一系列的规则从 X_1 、 X_2 和 X_3 之中挑选出来的,而这些规则就是通过 P_e 确定的。

2.3 Palmer 指数估算干旱等级

通过连续监测 2008—2010 年的降雨数据并对 PDSI 进行计算,得出 PDSI(图 1)中的 X 值,并进行对比分析(表 1),发现干旱是由轻旱不断累积向重旱过渡,最终导致干旱不断蔓延^[11]。

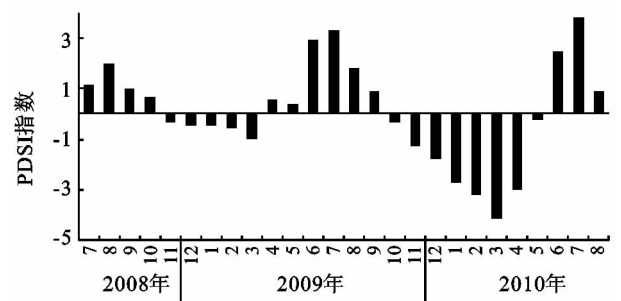


图 1 2008 年 7 月—2010 年 8 月顶坛小流域 PDSI 指数

通过逐月 PDSI 变化可知,该地区干旱持续性非常严重,且局地会产生高温气候,高温也会加强降雨量对于地表植物的作用,最终导致石漠化加剧。干旱长期循环出现对于该地区石漠化治理产生了巨大的抑制作用。

表 1 Palmer 指数干旱等级划分标准

级别	干旱等级		指数范围
	名称	危害程度	
1	无旱	无危害	$X \geq -0.99$
2	轻旱	轻微危害	$-1.00 \geq X \geq -1.99$
3	中旱	中等危害	$-2.00 \geq X \geq -2.99$
4	重旱	严重危害	$-3.00 \geq X \geq -3.99$
5	特旱	特重危害	$X \leq -4.00$

3 结果与分析

3.1 干旱灾害分析评价

喀斯特峡谷区特殊的岩性与复杂的地质构造及强烈的水动力条件,导致地貌纵向发育强烈,地域景观垂直分异明显,地形绵延起伏。由于地势落差大,土少地薄且保水能力差^[12]。区内碳酸盐岩广泛出露,喀斯特地貌极为发育,占土地总面积的 78%。地形破碎,基岩裸露率高,水土流失严重,石漠化强度发育,生态环境十分脆弱^[13]。导致地表保水能力和调控能力低,降雨很快沿裂隙、漏斗、落水洞及无地表植被覆盖的坡面流入地下和深切峡谷。地表农业干旱是根据干旱发生的强度与频率来确定的,对其进行评价的根本途径即为农作物需水量^[14]。对该地区的降水进行连续监测并分析连续 3 a 的数据发现,正常年份的降雨总量可以保证人们的正常生活需要,但在 2009 年和 2010 年这两年降水不足且持续时间长(图 1),每年的 7 月到次年的 5 月降水量少,干旱类型以秋旱和春旱为主,且降雨时空分布不均匀,此时发生大规模干旱存在隐患,该地区大部分降水集中在夏季,如果夏季受气候影响将会对农业生产和人畜饮用存在大规模隐忧,加之水利设施修建不够科学科学合理,造成由中旱经重旱到特旱的灾害过程(图 2)。

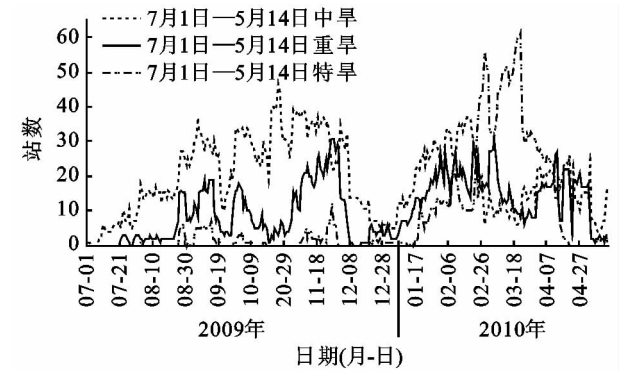


图 2 顶坛小流域 2009-07-01—2010-05-07 干旱灾害演变过程

3.2 干旱气候下水资源工程性保障措施

流域内 210 国道盘山而过,国道车辆通行量少,几乎为该区域居民所用,对外交通条件好,但通往村寨及田间地块的多为坡度大且岩石多的小路,条件非常差,严重制约了农业耕作和社会文化的发展^[15]。

据调查,流域内牛场、瓦厂各有提水站 1 个,查尔岩、石板寨、田坝等地共有泉点引水水池 12 口,容量约为 8 000 m³,基本可以保障生活用水^[16]。在干旱气候下无明显降雨后无法保障作物正常的需水量,最终导致作物干死,流域内现有约 20% 农户利用屋顶集雨^[17]。现阶段有很多村民自家修建水池水窖储藏饮用水,但其设计规格和思路科学性不强,导致很多雨水无法被有效利用,大部分群众选择从牛场镇拉水再注入水窖中贮存。当地农民无主动浇灌作物习惯,所以流域内的作物生长几乎全靠天然降水来保障。由于深切峡谷结构的存在及地表河的流经,花江峡谷区不存在自然资源性的缺水,更多意义上是工程性的缺水^[18],所以在该区建立足够的水利设施可以降低旱灾带来的危害。针对干旱灾害气候,自然降雨无法保障水资源供应的状况,通过将蓄水池、引水渠用管路连接起来形成微系统,修建提灌站从北盘江提水,将已建水池与输水管道配套建设,达到逐级抽提,保障水资源最大化。在喀斯特地区水资源可持续发展能力评价单元中,均水资源量,反映的是区域水资源对区域生态、经济等的作用,其值越大,对区域的可持续发展贡献越大,选择标准为理想值:4 000 m³/人。加大区域小型水利工程投入,以改善农户人畜饮水设施为重点,不断改善农田水利建设。

经研究,小流域内每户人畜饮水约为 40 L/d,旱地灌溉用水约为 50~225 m³/hm²。为保障用水安全,每 10 户配套建设 100 m³ 蓄水池 1 个;每 2 hm² 旱地修建 100 m³ 蓄水池 1 个,一次灌水周期为 3~4 d;坡耕地每 1 hm² 修建 50 m³ 蓄水池两个或 100 m³ 蓄水池 1 个,一次灌水周期为 2~3 d,每年灌溉两次。当修建提水泵以后用输水管将现有的水利工程形成管网状水利系统^[19],通过分级蓄水浇灌作物。修建泵站后一般不需修建大型挡水或引水建筑物;受水源、地形、地质等条件的影响较小,一次性投资少、工期短、受益快,并能因地制宜地及时满足灌溉的要求^[20]。但在运行期间需要消耗能量和经常性地维护、修理,其管理费用比自流灌溉高^[21]。由于北盘江水量充足且无冰期是水源的最佳选择,水量大且稳定。选取其作为水源,主要作为农业用水,拟建立两个泵站对地表水进行抽提^[22]。设计年限为 15 a,人口自然增长率 0.12%;设计最高日用水量定额:有可靠水源 $q=60$ L/人·d;灌溉用水量,根据经验值,区域内干旱期灌水周期考虑为 7 d,灌水定额为每亩每次浇水 1.32 m³;每年设计补水 24 次,即灌溉定额为 31.7 m³;效益区一次灌溉需水量为 $1.32 \times 120=159$ m³。农业灌溉时间为 7 日,则日需水量为 23 m³。通

过在干旱时节开发利用地表水,可以极大地降低气候对农业生产和现有生态环境的保障,也为保障地方经济增长做出了示范,最终为降低石漠化发展提供了重要保障^[23]。

4 结论与讨论

(1) PDSI 指数考虑多种干旱因子耦合作用过程,在喀斯特石漠化区干旱预测和水文分析中具有重要指导意义。该地区雨热同期,夏季干旱容易造成大面积灾害,且易持续,并可能出现极端酷暑天气,不利于农作物生产。

(2) 根据不同植物在干旱气候条件下的生态需水量^[24],对于该流域的水资源开发进行水量估算,通过合理的模型进行水文预报,针对不同作物合理布设农田水利工程。在没有表层岩溶泉的地方,准确寻找集雨面并修建水窖供饮用,设计规模保持在 20~30 m³;针对有表层岩溶泉的地方,选择集流管路工程,引水到附近的水池中形成微型水利系统供人饮用;针对干旱灌溉首先选择从北盘江进行分级提水,以节省供电能源,节省供电资源和对每个提灌泵的功率要求,同时也降低了一次提灌工程下中最高处蓄水池的容积。

(3) 由于当地经济水平的整体提升,现阶段每家每户都有建立水池水窖的习惯,但是不够科学合理,很多水池处于无水荒废状态,针对现有小型蓄水工程的不合理性,选择用引水管与一些集水效率高的水池进行连接,保障水利设施的最大化利用。

参考文献:

[1] 袁道先. 岩溶石漠化问题的全球视野和我国的治理对策与经验[J]. 草业科学, 2008, 25(9): 19-25.

[2] 杨明德, 屠玉麟, 熊康宁, 等. 贵州花江喀斯特峰丛峡谷脆弱生态环境治理与可持续发展示范研究[R]. 贵阳: 贵州师范大学, 2002.

[3] 韩会庆, 蔡广鹏, 张凤太, 等. 喀斯特地区县域土地集约利用评价[J]. 水土保持研究, 2012, 19(1): 243-245.

[4] 尹辉, 蒋忠诚, 罗为群, 等. 西南岩溶区水土流失与石漠化动态评价研究[J]. 水土保持研究, 2011, 18(1): 66-70.

[5] 王世杰. 喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵的探讨[J]. 中国岩溶, 2002, 21(2): 101-105.

[6] 徐新创, 葛全胜, 郑景云, 等. 农业干旱风险评估研究综

述[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(6): 263-270.

[7] 史运良, 王腊春, 朱文孝, 等. 西南喀斯特山区水资源开发利用模式[J]. 区域开发, 2005, 23(2): 52-55.

[8] 闫桂霞, 陆桂华, 吴志勇. 基于 PDSI 和 SPI 的综合干旱气象指数研究[J]. 水利水电技术, 2009, 4(40): 10-13.

[9] 卢耀如. 中国喀斯特地貌的演化模式[J]. 地理研究, 1986, 5(4): 25-33.

[10] 杨明德, 梁虹. 峰丛洼地形成动力过程与水资源开发利用[J]. 中国岩溶, 2000, 19(1): 44-51.

[11] 马良, 左长青, 秦冰, 等. 淮河流域降雨-侵蚀背景及时空演变特征[J]. 水土保持研究, 2012, 19(2): 22-25.

[12] 黄秋昊, 蔡运龙, 王秀春. 我国西南部喀斯特地区石漠化研究进展[J]. 自然灾害学报, 2007, 16(2): 106-111.

[13] 熊康宁, 黎平, 周忠发, 等. 喀斯特石漠化的遥感—GIS 典型研究: 以贵州省为例[M]. 北京: 地质出版社, 2002.

[14] 卢耀如, 杰显义, 张上林, 等. 中国岩溶(喀斯特)发育规律及其若干水文地质工程条件[J]. 地质学报, 1973(1): 121-137.

[15] 蔡运龙. 中国西南岩溶石山贫困地区的生态重建[J]. 地球科学进展, 1996, 11(6): 602-606.

[16] 周文龙, 熊康宁, 龙健, 等. 喀斯特石漠化综合治理区表层土壤有机碳密度特征及区域差异[J]. 土壤通报, 2011, 42(5): 1131-1137.

[17] 陈志祥, 王洪涛, 陈沐生. 西南岩溶山区集雨工程现状与对策[J]. 中国给水排水, 2004, 20(9): 31-33.

[18] 蒋忠诚, 袁道先. 西南岩溶区的石漠化及其治理综述[M]//中国岩溶地下水与石漠化研究. 广西出版社, 2003: 13-19.

[19] 苏维词. 花江喀斯特峡石漠化治理示范区水资源赋存特点及开发条件评价[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(6): 37-40.

[20] 贺中华, 陈晓翔, 梁虹, 等. 基于 NDVI 的水资源遥感定量监测及分析: 以贵州省为例[J]. 水土保持研究, 2012, 3(7): 161-165.

[21] 潘世兵, 路京选. 西南岩溶地下水开发与干旱应对[J]. 水资源管理, 2010, 13(2): 40-42.

[22] 高渐飞, 苏孝良, 熊康宁, 等. 中国南方岩溶区草地建设技术与示范[J]. 草业科学, 2010, 27(7): 30-34.

[23] 高渐飞. 喀斯特石漠化区基本农田建设与小型农田水利配套技术及模式集成研究: 以贵州典型试点小流域为例[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2011.

[24] 李洪远, 鞠美庭. 生态恢复的原理与实践[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.