

汶川震区震后土体入渗特征试验研究

宋国虎^{1,2}, 崔鹏¹, 郭晓军^{1,2}

(1. 中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所 山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 汶川地震对土体产生强烈扰动, 改变了流域下垫面特征, 影响到流域产流过程, 其中土体入渗特征是导致产流变化的基本因素。选择强震区都江堰龙溪河流域为典型研究区, 采用双环法进行野外原位土体入渗试验, 得出了泥石流流域不同类型土体的入渗特征。试验结果表明: (1) 不同类型土体的最终稳定入渗率大小顺序依次为: 林地(0.32 mm/min) > 草地(0.30 mm/min) > 耕地(0.28 mm/min) > 泥石流堆积体(0.19 mm/min) > 滑坡体(0.17 mm/min) > 裸地(滑坡后壁)(0.07 mm/min); (2) 研究区土体的稳定入渗率与孔隙度呈幂指数的正相关关系($R=0.95$); 前期含水率和细颗粒含量对林地、草地、耕地等土体入渗率的影响不明显, 但滑坡体、泥石流堆积体、裸地等土体的稳定入渗率与细颗粒含量之间呈较强的负相关关系。细颗粒含量对土体入渗的影响远小于由根系及其腐烂空洞的影响, 从而导致根系发育土体内的细颗粒含量对土体入渗影响不大。此外, 土体表面结皮能显著降低研究区土体的入渗性能。

关键词: 汶川震区; 土体入渗; 稳定入渗率; 龙溪河流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)04-0248-05

中图分类号: P 642.23

Infiltration Characteristics Experiment in Wenchuan Earthquake Zone

SONG Guo-hu^{1,2}, CUI Peng¹, GUO Xiao-jun^{1,2}

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Key Laboratory of Mountain Hazards and Land Surface Progress, CAS, Chengdu, Sichuan 610041, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The soil suffered strong disturbance by the Wenchuan earthquake. It has changed the underlying surface characteristic and influenced the runoff process. The soil infiltration characteristic was the fundamental factor that changed the runoff producing. Longxi River basin in serious Wenchuan Earthquake zone was chose as the study area and double-ring devices was used to conduct the in-situ test. Infiltration characteristics in different types of soils were obtained. The results showed that the saturated stable infiltration rates of different types of soil including forest land, grassland, cultivated land, debris flow fan, landslide land and bare land were 0.32, 0.30, 0.28, 0.19, 0.17 and 0.07 mm/min, respectively. The saturated stable infiltration rate was closely related to the porosity with a correlation coefficient of 0.95. The fine grains and antecedent soil moisture content presented an obvious negative correlation with infiltration rates in debris flow fan, landslide land, bare land, however, they showed no significant influence to forest land, grassland, and cultivated land. Influence of fine grains on infiltration was much weaker than the root system and its rot hole. In addition, soil crust could significantly reduce the soil infiltration.

Keywords: Wenchuan earthquake zone; infiltration ; stable infiltration rates; Longxi River basin

发生于青藏高原东部边缘龙门山断裂带的汶川地震致使地表强烈扰动, 触发了大量的滑坡、崩塌和碎屑流, 毁坏大面积植被。强烈地表扰动和毁灭性、大面积植被毁坏, 改变了地表水入渗、产流和汇流条件, 使水文过程发生明显变化, 利于侵蚀和洪峰的形成^[1]。地震扰动形成的崩塌、滑坡体结构松散, 密实度降低, 孔隙率增大, 降雨极易入渗, 使得地表径流减

少, 土体饱和度增加, 易于失稳转化形成泥石流, 使得泥石流起动的临界雨量大大降低。唐川和梁京涛据 2008 年北川县“9·24”特大泥石流形成的降雨量研究发现^[2], 地震后该区域泥石流起动的前期累计雨量较震前降低 14.8%~22.1%, 小时雨强降低 25.4%~31.6%。因此, 研究震后土壤水分入渗特征对于分析震后流域产汇流特征及山洪、泥石流等次生山地灾

收稿日期: 2012-08-08

修回日期: 2012-11-08

资助项目: 中国科学院知识创新重点部署项目课题“泥石流动力学过程及其调控模拟”(KZZD-EW-05-01); 国家自然科学基金重点项目(41030742)

作者简介: 宋国虎(1989—), 男(汉族), 陕西省富平县人, 硕士研究生, 主要研究方向为水文灾害学。E-mail: justdoitsgh@126.com。

通信作者: 崔鹏(1957—), 男(汉族), 陕西省西安市人, 研究员, 主要研究方向为山地灾害与水土保持。E-mail: pengcui@imde.ac.cn。

害的防灾减灾具有重要意义。

入渗是指降落到地面的雨水从地表渗入到土壤内的运动过程^[3]。植被覆盖、初始土壤含水率、土壤物理特征等因子均会对水分入渗产生直接影响^[4-5]。植被不仅能够增加土壤的孔隙度,而且还能够起到阻滞地表水流,延长入渗时间的作用;初始土壤含水率决定着土壤初始入渗量和初期吸水能力的大小。土壤吸水性、持水性和透水性等水理特征的变化直接影响水分的入渗,决定土壤的吸水量和透水量。而土壤的质地、结构决定土壤的可能最大吸水和透水能力。本研究以汶川地震强震区都江堰龙溪河流域作为研究对象,根据土体破坏类型和土地利用等条件,分别选取受扰动程度较轻的林地、草地,和受到强烈扰动的裸地、地震造成的滑坡体、泥石流堆积体等作为典型试验点,采用野外双环原位试验,研究土体的垂向入渗特征,为进一步分析震后小流域产汇流特征提供基础数据。

1 研究区概况

研究区位于都江堰市龙溪河流域,地理坐标为 $31^{\circ}2'31.71''-31^{\circ}10'27.49''N$, $103^{\circ}31'51.81''-103^{\circ}35'6.11''E$ 。龙溪河属于岷江水系的一级支流,呈南北展布,全长约18.22 km,流域面积87.6 km²,流域形状呈树杈状,支沟发育,震后多数支沟发育泥石流。龙溪河流域在地质构造体系上位于龙门山构造带的中南段,地质构造复杂,区内褶皱构造和断裂构造发育。褶皱构造有彭灌复背斜,青城山向斜和背斜;断裂构造有虹口—映秀断裂北支和虹口—映秀断裂南支。其中,虹口—映秀断裂(映秀—北川断裂的一段)北支就是汶川地震的发震断裂。汶川地震期间,流域内形成了大量的崩塌滑坡及松散堆积物。流域内出露的岩性主要以花岗岩、砂岩、泥岩、碳质页岩为主,安山岩、凝灰岩及安山玄武岩次之,第四系崩滑堆积物和洪积物也广泛分布。汶川地震后,龙溪河流域在2008年5月12日、2008年6月24日、2008年9月25日和2009年7月17日相继有13条泥石流沟暴发泥石流。2010年8月13日和8月18日再次暴发大规模、群发性泥石流,流域内共51处暴发泥石流灾害。泥石流灾害对地震灾后居民重建安置点、耕地、公路以及河道造成严重破坏,带来巨大经济损失。

研究区属四川盆地中亚热带湿润季风气候区,气候温和,多年平均气温12.2℃,最高气温35℃,极端

最低温-4.1℃。降水充沛,具有降雨强度大、暴雨频率高、降水集中、季节分配不均等特点,据都江堰市气象局气象资料^[6],该区多年平均降水量1134.8 mm,最大年降雨量达1605.4 mm(1978年);最大月降水量为592.9 mm,最大日降水量达245.7 mm,最大1 h降水量为83.9 mm,最大10 min降水量为23.98 mm,一次连续最大降水量为457.1 mm,降水主要集中在5—9月,占全年降水量的80%以上。

2 研究内容与方法

2.1 研究内容

汶川地震致使植被大面积破坏,野外实地调查发现,山体上方分布大面积的裸地,松散固体物质主要分布于坡体的中下部及流域沟道内,极大地改变了原先流域的产汇流特征。为了研究震后地表产流特征,首先需要确定流域内主要土地利用类型的土体入渗特征。选取龙溪河流域内典型的土地类型:(1)受地震强烈扰动的裸地、地震形成的滑坡体、泥石流堆积体;(2)植被未经破坏的林地、草地、耕地等土体进行原位入渗试验。

2.2 试验方法

采用同心双环入渗仪进行土壤入渗测定。同心双环入渗仪由直径分别为35和50 cm的两个内外金属圆环组成,内外环高度均为20 cm。试验时,将内外两个圆环同心打入土中约10 cm,在内外环距土体表面3 cm处用记号笔标注。然后向两个环内注水至内外环均保持固定水深3 cm标注位置。试验时,外环加水与内环平衡,抑制内环侧渗;内环用作试验测量。试验时,内外环分别用两个带刻度尺的水桶供水,按照设定的时间间隔记录内环下渗的水量,连续记录内环供水量。为了便于比较试验结果,试验采用统一的时间标准,前2 min每30 s记录1次,2~30 min每1 min记录1次,30 min以后每2 min记录1次直至入渗率稳定,试验结束。

3 结果与分析

3.1 土体特性测试

土壤的质地、结构和初始含水率等因素影响着土壤的入渗率^[7]。因此,测定土体特征是研究土体入渗的基础。对所选取的6类土体,分别测定前期重量含水率和孔隙度。各类土体的孔隙度和前期重量含水率详见表1。

表1 各类土体前期含水率和孔隙度

土体特性	林地土体	耕地	泥石流堆积体	草地	滑坡体	裸地
前期含水率/%	13.9	9.9	4.3	10.8	4.8	6.4
孔隙度/%	47.6	44.9	40.5	45.8	38.5	31.4

在 6 个典型试验点取样,通过风干筛分确定粗粒部分含量,利用马尔文粒度仪测定细粒含量,从而得到各类型土体的颗粒分布曲线。表明研究区各类土体中,砾石成分所占的比例最大,均超过 54%;沙粒次之,约占 30%~40%;黏粒和粉粒含量所占比例最小,均小于 5%。汶川地震造成土体松散程度增加,同震时形成的大量崩滑体,风化程度较弱,加之在随后的降雨作用下,细颗粒随降雨在土体中进行迁移,导致滑坡体细颗粒含量较少,仅含 1.4%。各类土体颗粒组成详见表 2。

3.2 试验结果

分析各类植被类型下土体的入渗过程,可以采用霍顿公式较好地拟合,其基本形式为:

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c) \times \exp(-kt) \quad (1)$$

式中: $f(t)$ —— t 时刻的入渗率; f_0 ——初始入渗率; f_c ——稳定入渗率; k ——经验参数。各类植被类型下土体的入渗过程拟合曲线如图 1 所示。

土体类型	砾石含量	沙粒含量	细粒含量
林地	62.1	34.1	3.8
耕地	66.0	30.6	3.4
草地	54.4	42.6	3.0
泥石流堆积体	80.7	18.7	0.5
滑坡体	65.4	33.2	1.4
裸地	56.9	38.9	4.2

由图 1 可见,各类土体在充分供水条件下的入渗曲线均是一条递减曲线。根据入渗速率递减的快慢,可将入渗曲线分为渗润、渗漏和渗透 3 个阶段^[8]:第 1 阶段为渗润阶段,在这个阶段土壤含水率较小,入渗容量大,入渗率随时间递减迅速;第 2 阶段为渗漏阶段,由于土壤含水量不断增加,入渗容量明显减小,入渗率随时间递减变得缓慢;第 3 阶段为渗透阶段,土壤含水量达到田间持水量,入渗率趋于稳定。

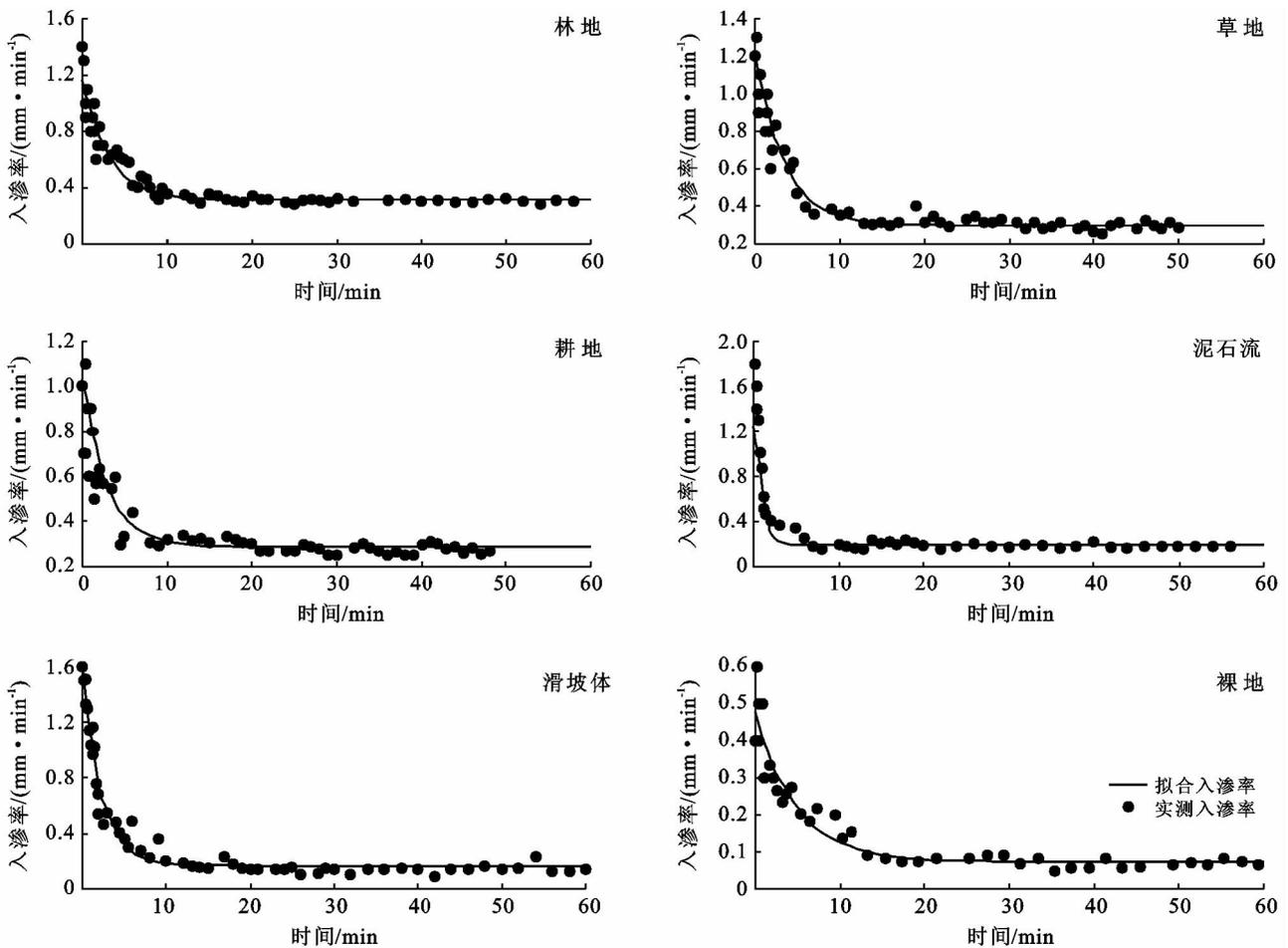


图 1 研究区不同类型土体的入渗曲线

从图 1 还可看出,不同类型土体的入渗特征具有较大的差异。在受地震扰动剧烈、植被破坏严重的裸地、由地震造成的滑坡体和泥石流堆积体这 3 种土体

中,泥石流堆积体的初始入渗率最大,滑坡体次之,裸地最小;在渗润阶段,入渗率快速减小,其中泥石流堆积体的入渗率减小的速度最快,滑坡体次之,裸地最

小;渗透阶段,稳定下渗率的大小依次为泥石流堆积体、滑坡体和裸地。而对于植被覆盖较好的林地、草地和耕地,林地的初始入渗率最大,草地次之,耕地最小;在渗润阶段,3类土体入渗率的减小速度大致相同;而在渗透阶段,稳定入渗率从大到小依次为林地、草地和耕地,且3者相差不大(表3)。

表3 研究区6类土体的初始入渗率和稳定入渗率

土体类型	mm/min	
	初始入渗率	稳定入渗率
林地	1.23	0.32
草地	1.21	0.30
耕地	0.93	0.29
泥石流堆积体	2.24	0.19
滑坡体	1.61	0.17
裸地	0.48	0.07

3.3 影响土体入渗率的因素分析

入渗率受到多种因素的影响^[9]。主要影响因素有土壤理化性质,如土壤质地、容重和孔隙度、团聚体和有机质、土壤结皮等;下垫面性质,如植被类型、盖度、坡度、坡向、土地利用方式等;降雨条件,如降雨强度、水质与水温等。本试验测定了6类土体的前期含水率、天然密度和孔隙度、颗粒级配特征等土体物理特征参数。以对影响研究区土体入渗率的主要因素进行分析。

3.3.1 前期含水率对初始入渗率的影响 土体前期含水率对入渗的影响主要反映在入渗初期,6类土体初始入渗率与前期含水率的拟合结果表明,对泥石流堆积体、滑坡体和裸地而言,前期含水率与初始入渗率呈负相关关系;而对于耕地、林地和草地,二者的关系不明显。前期含水率对入渗的影响主要表现在两个方面:(1)前期含水量越大,同一土体的吸水量越小;(2)土体内部颗粒吸水膨胀,造成空隙收缩,导致入渗速率下降。不同类型的土体,影响其入渗的主要因素不同,对于林地、草地和耕地而言,植被根系空隙和土壤有机质及根系腐烂后形成的空隙是影响土体入渗的主要因素;而对于滑坡体、泥石流堆积体、裸地等缺乏植被根系及有机质的土体,影响其入渗的因素主要是前期含水率、孔隙度、表层结皮等物理因素。

3.3.2 孔隙度对稳定入渗率的影响 可用幂函数对实测的土体孔隙度与其对应的稳定入渗率进行较好地拟合,相关系数达到0.95,具有较好的相关性。表明孔隙度的大小,对入渗具有重要的影响^[10]。孔隙度增大,水分运动的空隙数量增加,入渗速率则相应的增大。

3.3.3 细颗粒含量对稳定入渗率的影响 土壤质地对土壤渗透性影响明显,粗质地土壤入渗特性从开始到结束始终快于细质地的土壤。但也有研究表明,砾石含量和机械组成与土壤稳定入渗率之间的关系不显著^[11-12]。本实验结果表明,林地、草地、耕地的稳定入渗率与土体中细颗粒(黏粒和粉粒)的含量相关关系不明显,而泥石流堆积体、滑坡体、裸地的稳定入渗率与土体中细颗粒的含量具有较好的递减关系。这是由于林地、草地、耕地等有机质含量比较丰富,微团聚体丰富,土体结构性好,植物根系发育,特别是根系形成的导水系统的作用会超过细颗粒的影响,稳定入渗率与细颗粒含量的相关关系不明显。而泥石流堆积体、滑坡体、裸地等,有机质含量、微团聚体和植物根系少,土体结构性差,细颗粒含量与稳定入渗率有明显的负相关关系。土壤的有机质会通过促进团聚体的形成间接影响土壤渗透性的大小,而团聚体的形成使土壤表面更加疏松,更有利于水分的入渗,土体的稳定入渗率与土壤的有机质含量之间存在显著的相关性^[13-15]。植物根系及其腐烂后的空洞,具有良好的导水性,对土体入渗在一定程度上具有主导作用。而细颗粒含量是通过土体结构(特别是细微结构)改变土体的空隙特性进而影响对土体入渗特征的,由细颗粒导致的土体空隙变化与由根系形成的空隙具有不同的尺度,可以认为细颗粒含量对土体入渗的影响远小于由根系及其腐烂空洞的影响,这是在根系发育的土体内细颗粒含量对土体入渗影响不大的重要原因。试验结果表明,裸地的稳定入渗率明显小于其他类型土体。这是因为降雨时雨滴落在裸露土体的表面,形成一种主要由细颗粒组成具有低孔隙度、高密度和低导水率的薄层结皮。土壤结皮会封堵土壤水分运动的通道,能显著降低土壤入渗速率。结皮对裸地的影响大大超过其他因素的影响^[16]。汶川地震导致强烈地表扰动和毁灭性、大面积植被毁坏,裸露土体在降雨作用下容易产生地表结皮,使得该类型土体的入渗率明显降低,利于产流以及侵蚀和洪峰的形成。

4 结论

通过野外双环原位试验,获得了汶川地震区不同类型土体的入渗特征。用霍顿公式拟合了入渗曲线,相关系数均在0.87以上。稳定入渗率按大小依次为:林地(0.32 mm/min) > 草地(0.30 mm/min) > 耕地(0.28 mm/min) > 泥石流堆积体(0.19 mm/min) > 滑坡体(0.17 mm/min) > 裸地(0.07 mm/min)。

研究区土体的稳定入渗率与孔隙度呈幂指数关

系,相关系数为 0.95。由于受到植物根系等因素的影响,前期含水率和细颗粒含量对林地、草地、耕地的入渗率影响不明显,而对滑坡体、泥石流堆积体、裸地等土体的稳定入渗率有显著影响。影响林地、草地、耕地等土体的稳定入渗率的因素除了与土体的物理性质有关外,还与土体的有机质含量和根系有关,且根系影响明显大于细颗粒的影响,从而导致根系发育土体内的细颗粒含量对土体入渗影响不大。此外,土体表面结皮显著降低研究区土体的入渗。

[参 考 文 献]

- [1] 崔鹏,庄建琦,陈兴长,等. 汶川地震区震后泥石流活动特征与防治对策[J]. 四川大学学报:工程科学版,2010,42(5):10-19.
- [2] 许强. 汶川大地震诱发地质灾害主要类型与特征研究[J]. 地质灾害与环境,2009,20(2):86-93.
- [3] 唐川,梁京涛. 汶川震区北川 9·24 暴雨泥石流特征研究[J]. 工程地质学报,2008,16(6):751-758.
- [4] 熊立华,郭生炼. 分布式流域水文模型[M]. 北京:中国水利水电出版社,2004.
- [5] 吴钦孝,韩冰,李秧秧. 黄土丘陵区小流域土壤水分入渗特征研究[J]. 中国水土保持科学,2004,2(2):1-5.
- [6] 陈洪松,邵明安,张兴昌,等. 野外模拟降雨条件下坡面降雨入渗,产流试验研究[J]. 水土保持学报,2005,19(2):5-8.
- [7] 余斌,马煜,张健楠,等. 汶川地震后四川省都江堰市龙池镇群发泥石流灾害[J]. 山地学报,2011,29(6):738-746.
- [8] 芮孝芳. 水文学原理[M]. 北京:中国水利水电出版社,2004.
- [9] 吕刚,吴祥云. 土壤入渗特性影响因素研究综述[J]. 中国农学通报,2008,24(7):494-499.
- [10] 郑纪勇,邵明安,张兴昌. 黄土区坡面表层土壤容重和饱和导水率空间变异特征[J]. 水土保持学报,2004,18(3):53-56.
- [11] 田积莹,黄义端,雍绍平. 增加土壤渗透,减少水土流失[J]. 水土保持通报,1988,8(3):25-30.
- [12] 张保华,何毓容,周红艺,等. 长江上游亚高山针叶林土壤水分入渗性能及影响因素[J]. 四川林业科技,2003,24(1):61-64.
- [13] 邵明安,王全九. 土壤物理学[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- [14] 王国梁,刘国彬,周生路. 黄土丘陵沟壑区小流域植被恢复对土壤稳定入渗的影响[J]. 自然资源学报,2003,18(5):529-534.
- [15] 闫东锋,杨喜田. 豫南山区典型林地土壤入渗特征及影响因素分析[J]. 中国水土保持科学,2011,9(6):43-50.
- [16] Moore I. Effect of surface sealing on infiltration[J]. Trans. ASAE,1981,24(6):1546-1561.
- [7] 李艳,王元,汤剑平. 中国近地层风能资源的时空变化特征[J]. 南京大学学报:自然科学版,2007,43(3):280-290.
- [8] 江滢,罗勇,赵宗慈. 近 50 年我国风向变化特征[J]. 应用气象学报,2008,19(6):666-672.
- [9] 荣艳淑,梁嘉颖. 华北地区风速变化的分析[J]. 气象科学,2008,28(6):655-658.
- [10] 刘苏峡,邱建秀,莫兴国. 华北平原 1951 年至 2006 年风速变化特征分析[J]. 资源科学,2009,31(9):1486-1492.
- [11] 李艳,耿丹,董新宁,等. 1961—2007 年重庆风速的气候变化特征[J]. 大气科学学报,2010,33(3):336-340.
- [12] 王毅荣,张存杰. 河西走廊风速变化及风能资源研究[J]. 高原气象,2006,25(6):1196-1202.
- [13] 黄小燕,张明军,王圣杰,等. 西北地区近 50 年日照时数和风速变化特征[J]. 自然资源学报,2011,26(5):825-835.
- [14] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements[C]. Rome: Food & Agriculture Org., 1998.
- [15] 康淑媛,张勃,郭玉刚,等. 1959 年至 2008 年石羊河流域日照时数时空变化特征[J]. 资源科学,2011,33(3):483-488.
- [16] 符淙斌,王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. 大气科学,1992,16(4):482-493.
- [17] 乔标,尹晓惠. 近 49 年中国北方典型强沙尘暴事件的分形特征与 R/S 分析[J]. 中国人口·资源与环境,2005,15(2):57-60.
- [18] 王存忠,牛生杰,王兰宁. 中国 50 a 来沙尘暴变化特征[J]. 中国沙漠,2010,30(4):933-939.
- [19] 江滢,罗勇,赵宗慈,等. 近 50 年中国风速变化及原因分析[C]//中国气象学会. 2007 年中国气象学会年会论文集,2007:80-89.
- [20] 李耀辉,张存杰,高学杰. 西北地区大风日数的时空分布特征[J]. 中国沙漠,2004,24(6):715-723.
- [21] 刘学锋,江滢,任国玉,等. 河北城市化和观测环境改变对地面风速观测资料序列的影响[J]. 高原气象,2009,28(2):433-439.
- [22] 吴增祥. 气象台站历史沿革信息及其对观测资料序列均一性影响的初步分析[J]. 应用气象学报,2005,16(4):461-467.
- [23] 马雪宁,张明军,王圣杰,等. “蒸发悖论”在黄河流域的探讨[J]. 地理学报,2012,67(5):645-656.
- [24] 姚正毅,王涛,陈广庭,等. 近 40 a 甘肃河西地区大风日数时空分布特征[J]. 中国沙漠,2006,26(1):65-70.
- [25] 孙然好,刘清丽,陈利顶,等. 河西走廊沙尘暴及其影响因子的多尺度研究[J]. 中国沙漠,2010,30(3):648-653.

(上接第 247 页)