

毛乌素沙地人为干扰苔藓结皮的土壤水分和风蚀效应

杨永胜^{1,2}, 邱永利⁴, 周小泉⁵, 穆兴民^{1,3}, 卜崇峰^{1,3}

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 4. 中国石油天然气股份有限公司 长庆油田苏里格南作业分公司, 陕西 西安 710000; 5. 新疆吉音水利枢纽工程建设管理局, 新疆 和田 848000)

摘要: [目的] 为了探讨在毛乌素沙地人为干扰生物结皮的必要性与可行性, 并为该区生物结皮的高效利用提供实验依据。[方法] 在毛乌素沙地东南缘设置裸沙、苔藓结皮、干扰苔藓结皮、沙蒿、沙蒿+苔藓结皮以及沙蒿+干扰苔藓结皮 6 个处理小区, 通过动态监测各小区土壤水分及风蚀变化过程, 分析人为干扰苔藓结皮对土壤水分及风蚀过程的影响。[结果] (1) 沙地苔藓结皮能够显著提高浅层土壤含水量, 降低深层土壤含水量。(2) 人为干扰苔藓结皮会引起浅层土壤含水量的降低和降雨入渗深度的增加。(3) 与裸沙对照相比, 几种处理的减蚀效率大小顺序为: 沙蒿+苔藓结皮(97.01%)>沙蒿+干扰苔藓结皮(90.87%)>苔藓结皮(89.63%)>干扰苔藓结皮(69.50%)>沙蒿(64.62%)。[结论] 植被覆盖度较高时, 对苔藓结皮进行适当破坏, 能够在不加剧土壤风蚀的前提下, 一定程度上改善土壤水分状况。而在无植被或低植被覆盖的地块, 要禁止对苔藓结皮的干扰破坏。

关键词: 毛乌素沙地; 水分; 风蚀; 干扰; 沙蒿; 苔藓结皮

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)01-0020-05

中图分类号: S152.7

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.01.005

Effects of Disturbed Moss Dominated Crusts on Soil Moisture and Wind Erosion in Mu Us Sandland

YANG Yongsheng^{1,2}, QIU Yongli⁴, ZHOU Xiaoquan⁵, MU Xingmin^{1,3}, BU Chongfeng^{1,3}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. Changqing Oilfield South of Sulige Branch of PetroChina Company Limited, Xi'an, Shaanxi 710000, China; 5. Xinjiang Jiyin Administration of Hydro-junction and Engineering Construction, Hetian, Xinjiang 848000, China)

Abstract: [Objective] To discuss the necessity and feasibility of biological soil crusts(BSCs) in the Mu Us sandland and provide an experiment basis for the efficient utilization of BSCs in this region. [Methods] Six treatments including bare sand, moss dominated crusts alone, disturbed moss dominated crusts alone, *Artemisia ordosica* alone, *A. ordosica* combined with moss dominated crusts and *A. ordosica* combined with disturbed moss dominated crusts were settled in the south edge of the Mu Us sandland, and the effects of BSCs on soil moisture and wind erosion were analyzed by dynamic monitoring the soil moisture and wind erosion of each treatment. [Results] (1) Moss dominated crusts in Mu Us sandland significantly improved the soil moisture content in shallow layer and reduced the soil moisture content in deep layer. (2) Human disturbance on moss dominated crusts reduced the soil moisture in shallow layer and increase the infiltration depth of rainwater. (3) Compared with bare sand, the contribution of other five treatments to reducing wind erosion were found to decrease in the following order: *A. ordosica* combined with moss dominated crusts (97.01%) > *A. ordosica* combined with disturbed of moss dominated crusts (90.87%) > moss dominated crusts alone (89.63%) > disturbance of moss dominated crusts alone (69.50%) > *A. ordosica* alone

收稿日期: 2013-12-13

修回日期: 2014-02-19

资助项目: 国家自然科学基金项目“毛乌素沙地生物结皮的风蚀和水分效应及其干扰响应”(41071192)

第一作者: 杨永胜(1987—), 男(汉族), 甘肃省兰州市人, 博士研究生, 研究方向为黄土高原苔藓结皮快速培育及抗逆性研究。E-mail: yysol-ider@126.com。

通信作者: 卜崇峰(1977—), 男(汉族), 陕西省榆林市人, 博士, 副研究员, 主要从事生物土壤结皮的生态功能研究工作。E-mail: buchongfeng@163.com。

(64.62%)。[Conclusion] Appropriate disturbances on moss dominated crusts covered by higher coverage of vegetation is beneficial to improving the soil water environment to certain degree on the premise that the wind erosion could not dramatically increase, but the disturbance in the sites without vegetation or with only little vegetation during gale seasons must be prohibited.

Keywords: Mu Us Sandland; soil moisture; wind erosion; disturbance; *Artemisia ordosica*; moss dominated crusts

生物土壤结皮(biological soil crusts, BSCs)是由藻类、地衣、苔藓等孢子植物类群与土壤颗粒有机结合形成的复合体^[1],广泛存在于干旱、半干旱地区^[2]。由于其生物组分可通过生理代谢活动改变土壤理化性质,促进土壤形成及植物营养转化^[3],使生物结皮在提高土壤抗侵蚀能力、固氮、固碳、土壤肥力、生物多样性、微地貌及水分循环等方面起着重要作用^[4-5]。因此,近年来有关生物结皮的研究逐渐成为半干旱地区生态研究的热点问题^[6]。

干扰是任何生态系统广泛存在的一种现象^[7],生物结皮结构上的特点决定了其抵抗人畜践踏、侵蚀、沙埋、火烧、动物挖穴等干扰的能力很弱^[8]。研究表明干扰会对生物结皮的组成成分^[9]、植物多样性以及种子萌发^[10]有很大的影响。来自腾格里沙漠的研究表明生物结皮会拦截降雨至浅层土壤^[11],减少降雨对深层土壤水分的补给^[12],终会导致深根系植物逐渐缺水死亡^[13]。据此有学者提出通过人为干扰措施破坏生物结皮以改善干旱区土壤水分环境的构想^[8],但这些观点多源自间接的、经验性的判断。当前,有关干扰对生物结皮的研究多集中在土壤理化性质^[14]、植物多样性以及微生物分布^[15]等方面,涉及干扰破坏结皮后沙地土壤水分环境及土壤稳定性方面的直接的、实证性的研究鲜有报道。此外,中国生物结皮方面的研究起步较晚,相关工作多集中在腾格里沙漠、库布齐沙漠和古尔班通古特沙漠等区域,而缺乏对年降雨量达到 400 mm 的毛乌素沙地研究^[16]。探讨毛乌素沙地生物结皮的土壤水分及抗风蚀效应也是对该领域研究工作重要补充。

基于以上原因,本研究选取毛乌素沙地封育区不同植被类型下苔藓结皮试验地块,设置人为干扰处理,通过对土壤水分、风蚀特征的长期定位监测,探讨人为干扰苔藓结皮的环境效应,以期为毛乌素沙地苔藓结皮资源的高效、合理利用提供借鉴。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省神木县圪丑沟(北纬 38°10′—39°05′,东经 109°40′—110°30′)。该区属干旱半干旱的大陆性气候,冬季严寒,霜冻期长;夏季酷热,日温

差大,多风少雨。多年平均降水量为 440.8 mm,60%~70%的降雨量主要集中在 7—9 月。平均蒸发量为 2 092 mm,平均气温 7.8 °C,最高月(7 月)平均气温 23.9 °C。最低月(1 月)平均气温 -9.8 °C。区内风沙天气频繁,春、秋两季西北风盛行,平均风速 3.2 m/s,最大风速 24 m/s,是当地主要的自然灾害,区内自然植被主要是耐旱性灌木和草本,包括沙蒿(*Artemisia ordosica*)、猪毛菜(*Salsola passerina*)和小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)。该区生物结皮的主要组分为苔藓结皮,仅在为数不多的杨树林迎风坡上发现藻类结皮。在研究区域内现已鉴定出的苔藓有黄色真藓(*Bryum pallenscens*)、弯形真藓(*Bryum recurvulum*)、银叶真藓(*Bryum argenteum*)以及少量的扭口藓(*Barbula unguiculata*)。

1.2 研究方法

1.2.1 小区布设 通过前期调查选择生物结皮广泛分布的宽阔丘间低地,设置野外小区,大小为 2 m×3 m。试验小区位于同一丘间低地,分散分布。供试土壤 0—2 cm 土层基本性质见表 1。土壤容重为 1.5 g/cm³左右。试验共设 6 个处理:裸沙、苔藓结皮、干扰苔藓结皮、沙蒿、沙蒿+苔藓结皮、沙蒿+干扰苔藓结皮。每个处理 3 个重复。沙蒿、生物结皮盖度分别达到 60%和 95%。其中,干扰苔藓结皮及沙蒿+干扰苔藓结皮是 2010 年 10 月通过齿间距为 3 cm 的铁耙子进行人为干扰实现。

表 1 苔藓结皮层及裸沙表层(0—2 cm)土壤粒径分布

粒径/mm	<0.002	0.002~0.02	0.02~0.2	0.2~2
苔藓结皮/%	0.7	2.0	35.1	62.2
裸沙/%	0.3	1.1	12.5	86.1

1.2.2 水分和风蚀监测 水分监测选择在 5—10 月进行。使用土钻法测定小区中部 100 cm 垂直剖面土壤水分。其中,0—2 cm,5—10 cm 土层分别测定土壤质量含水量。10—100 cm 土层每隔 10 cm 测定。

2010 年 10 月将 50 cm 长的风蚀针插入小区,地上露出 20 cm,地下插入 30 cm。次年 4 月读 1 次数,其后每隔 2 个月读 1 次数,至次年 10 月结束。通过风蚀针刻度的变化计算风蚀模数(土壤容重为 1.5 g/cm³)。

1.2.3 数据分析 试验数据运用 Microsoft Excel 2003 进行处理与分析,数据表达为平均值±标准误 (Means±SE)。处理间的差异用 SPSS 12.0 中的 One-way ANOVA 模块实现。

2 结果与分析

2.1 苔藓结皮对土壤水分的影响

表 2—3 分别展示了各处理小区季初(6月20日,雨季初期,低补给,低消耗)和季末(10月6日,雨季末期,高补给,高消耗)0—100 cm 土层剖面的含水量分布状况。6种处理小区的含水量均低于8%。同时发现,2种地表覆盖情况下,有无苔藓结皮覆盖的小区剖面含水量呈现出一定的规律性特征。

(1) 地表无植被覆盖。雨季初期(表 2),与裸沙相比,苔藓结皮小区 0—50 cm 深度范围内土壤含水量均显著提高($p < 0.05$),60 和 70 cm 土层二者无显

著差异,70 cm 以下则是裸沙较高。至季末(表 3),0—40 cm 范围内苔藓结皮小区土壤含水量均明显高于裸沙($p < 0.05$)。在 50—80 cm 土层,二者无显著差异,80 cm 以下则是裸沙较高。表明沙地苔藓结皮能够显著提高浅层土壤含水量,降低深层土壤水分含量。

(2) 地表有沙蒿覆盖。雨季初期(表 2),沙蒿+苔藓结皮小区 0—10 cm 深度土壤含水量均高于沙蒿小区。20 cm 以下则是沙蒿+苔藓结皮小区较低,且随着深度的增加差异越明显($p < 0.05$)。雨季末期(表 3),沙蒿+苔藓结皮小区 0—2 cm 范围内土壤含水量比沙蒿小区高 475% ($p < 0.05$)。在 10—50 cm 土层,二者无显著差异。60 cm 以下沙蒿+苔藓结皮小区土壤含水量均显著低于沙蒿小区。再次表明苔藓结皮能够提高浅层土壤水分,降低深层土壤水分含量。

表 2 雨季初期(6月20日)各处理小区土壤含水量随深度的变化(平均值±标准误)

深度/ cm	土壤含水量/%					
	裸沙	苔藓结皮	干扰苔藓结皮	沙蒿	沙蒿+苔藓结皮	沙蒿+干扰苔藓结皮
2	0.00±0.00a	0.43±0.08b	0.60±0.05b	0.07±0.07a	0.08±0.01a	0.14±0.05a
5	0.08±0.08a	0.97±0.44b	0.83±0.05b	0.07±0.04a	0.09±0.04a	0.20±0.01a
10	0.29±0.01a	3.72±0.85c	1.88±0.12b	0.22±0.14a	0.25±0.04a	0.43±0.06a
20	1.05±0.26a	5.47±0.37b	5.68±0.14b	1.19±0.55a	0.53±0.12a	0.65±0.05a
30	1.68±0.14b	6.10±0.27c	6.78±0.10d	1.07±0.12a	0.82±0.25a	0.98±0.17a
40	1.75±0.14a	6.19±0.81b	6.35±0.32b	1.55±0.15a	1.13±0.31a	1.34±0.24a
50	2.11±0.21a	4.20±0.32b	5.96±0.50c	1.88±0.11a	1.35±0.36a	1.67±0.37a
60	2.03±0.41ab	3.08±0.55b	3.44±0.43b	2.23±0.22ab	1.84±0.62ab	1.52±0.34a
70	2.75±0.67a	2.48±0.42a	2.27±0.22a	2.09±0.26a	1.83±0.44a	1.48±0.36a
80	4.04±0.26c	1.97±0.41ab	1.39±0.22ab	2.20±0.42b	1.14±0.33a	1.38±0.33ab
90	4.35±0.04d	1.59±0.24bc	1.34±0.02ab	2.03±0.35c	0.77±0.22a	1.26±0.30ab
100	4.93±0.12d	1.41±0.09abc	1.48±0.02bc	1.92±0.39c	0.89±0.18a	0.93±0.07ab

注:字母相同代表组间差异不显著($p > 0.05$),字母不同代表组间差异显著($p < 0.05$)。下同。

表 3 雨季末期(10月6日)各处理小区土壤含水量随深度的变化(平均值±标准误)

深度/ cm	土壤含水量/%					
	裸沙	苔藓结皮	干扰苔藓结皮	沙蒿	沙蒿+苔藓结皮	沙蒿+干扰苔藓结皮
2	0.25±0.01ab	0.93±0.08d	0.89±0.02d	0.08±0.04a	0.46±0.12c	0.32±0.05bc
5	0.50±0.20a	1.72±0.33b	1.41±0.24b	0.18±0.04a	0.43±0.04a	0.51±0.04a
10	1.32±0.45a	3.49±0.68b	4.14±0.28b	0.84±0.10a	0.74±0.09a	0.87±0.06a
20	2.50±0.44b	6.40±0.21c	6.62±0.26c	1.41±0.18a	1.51±0.14a	1.24±0.12a
30	2.69±0.41b	6.48±0.33c	7.38±0.59c	2.54±0.31ab	2.15±0.37ab	1.33±0.43a
40	2.57±0.12ab	6.01±0.26c	6.79±0.82c	2.68±0.34b	2.62±0.22b	1.31±0.13a
50	2.77±0.98ab	4.97±1.34bc	6.05±1.05c	3.00±0.37ab	2.38±0.22a	0.92±0.13a
60	3.26±0.67b	3.15±0.35b	3.20±0.42b	3.38±0.50b	2.26±0.22ab	0.99±0.05a
70	3.94±0.59c	3.73±0.19c	2.00±0.32ab	2.98±0.32bc	1.74±0.12a	1.31±0.10a
80	4.03±0.57c	3.39±0.27bc	1.85±0.22a	3.06±0.07b	1.08±0.20a	1.35±0.14a
90	4.54±0.48c	2.88±0.35b	1.86±0.26ab	2.80±0.56b	1.05±0.09a	1.21±0.07a
100	5.73±0.55c	2.40±0.28b	1.50±0.12ab	2.46±0.43b	0.92±0.09a	1.29±0.18a

2.2 苔藓结皮的人为干扰对土壤水分的影响

(1) 地表无植被覆盖。雨季初期(表 2), 干扰苔藓结皮小区与苔藓结皮小区 0—2 cm 范围土壤含水量无明显差异, 20—60 cm 土层干扰苔藓结皮小区较高。其中, 30 和 50 cm 处达到显著水平($p < 0.05$)。至季末(表 3), 干扰苔藓结皮小区在 10—60 cm 土层土壤含水量均高于苔藓结皮小区。其中, 干扰苔藓结皮小区在 30—60 cm 土层平均土壤含水量比苔藓小区高 13.38%, 二者差异未达到统计学上的显著水平。表明人为干扰苔藓结皮层会引起浅层土壤含水量的降低和降雨补给深度的增加。

(2) 地表有沙蒿植被覆盖。雨季初期(表 2), 沙蒿+干扰苔藓结皮小区 0—100 cm 垂直剖面土壤含水量均高于沙蒿+苔藓结皮小区(除 60—70 cm 土层外), 二者差异未达到统计学上的显著水平。雨季末

期(表 3), 与沙蒿+苔藓结皮相比, 沙蒿+干扰苔藓结皮小区 30—60 cm 范围土壤含水量明显较低, 70 cm 以下沙蒿+干扰苔藓结皮小区逐渐高于沙蒿+苔藓结皮。

2.3 苔藓结皮及其干扰对风蚀的影响

表 4 为各小区年风蚀量。可以看出苔藓结皮或沙蒿均发挥了极为显著的减蚀作用。与裸沙相比, 几种处理的减蚀效率大小顺序为: 沙蒿+苔藓结皮(97.01%) > 沙蒿+干扰苔藓结皮(90.87%) > 苔藓结皮(89.63%) > 干扰苔藓结皮(69.50%) > 沙蒿(64.62%)。值得注意的是, 沙蒿+苔藓结皮的减蚀效率高达 97.01%, 对沙蒿下苔藓结皮进行干扰后, 减蚀效率仅下降 6.04% ($p > 0.05$)。当地表无沙蒿植被时, 人为干扰会使苔藓结皮的减蚀效率显著降低 ($p < 0.05$)。

表 4 2011 年各小区年风蚀量

处 理	裸沙	苔藓结皮	干扰苔藓结皮	沙蒿	沙蒿+苔藓结皮	沙蒿+干扰苔藓结皮
年风蚀量	167.1c±11.0c	17.3c±5.04a	51.0±9.90b	59.1a±10.10ab	5.00±2.90a	16.80±2.20a
减蚀效率	0	89.63±3.02b	69.50±5.93a	64.62±6.02a	97.01±1.73b	90.87±1.34b

3 讨论与结论

本研究结果表明, 生物结皮能够将降雨拦截在浅层土壤中, 减少深层土壤含水量。原因主要有以下几点: 首先, 生物结皮丝状体及黏结在结皮表面的细颗粒物堵塞表层土壤空隙, 能够延长水分在结皮层中的滞留时间^[17]; 其次, 生物结皮层及其下土壤具有较强的蓄水^[18]、保水能力^[19], 能够阻止土壤水分向深层入渗。人为干扰苔藓结皮, 扰动浅层土壤, 这会降低前述生物结皮的各种吸纳消耗作用, 进而引起土壤表层含水量的降低和降雨补给深度的增加。这对于减少水分的无效蒸发和增加深根性植被的生态用水有着重要的意义。

学者一致认为生物结皮会提高土壤抗蚀性, 显著降低土壤风蚀量^[5]。我们在毛乌素沙地的试验也证明了这一点。本研究显示对无植被区域苔藓结皮进行人为干扰后, 其减蚀能力会显著降低, 但沙蒿+干扰苔藓结皮小区与沙蒿+苔藓结皮小区相比, 其减蚀效率仅下降 6.04%。据此认为, 在地表无植被或者植被覆盖较低时, 要对苔藓结皮进行严格保护, 避免人为干扰加剧土壤流失。植被盖度较高时, 对苔藓结皮进行干扰破坏不会引起土壤风蚀量的急剧增加。杜建会等在腾格里沙漠的研究也得出了相似的结论^[20]。

本研究结果显示, 当植被盖度较高时, 干扰苔藓

结皮能够增加降雨补给深度, 且不会引起风蚀的急剧增加。研究区沙蒿植被 3 月中旬开始生长, 7 月进入生长旺盛期, 在沙蒿生长期风速逐渐减小, 降雨量逐渐增加。因此, 我们认为在植被覆盖度较高的地块, 在 4 月底 5 月初(风季末期、雨季初期)对苔藓结皮进行适当破坏并不会加剧土壤风蚀, 而且还可以在在一定程度上增加深层土壤水分。在无植被或植被覆盖极差的地块, 生物结皮发挥主要的防风固沙作用, 人为干扰不当可能会引起沙漠化的发生^[5], 这类地段要严格禁止对苔藓结皮的干扰破坏。需要指出, 本试验是以铁耙均匀划破植被下苔藓结皮这种干扰方式进行研究的, 诸如人畜踩踏、火烧以及机械碾压等其他干扰方式下, 苔藓结皮的水分和抗风蚀效应应该有所不同, 应进一步深入研究。

致谢: 陕西省神木县生态学会治沙造林基地对本研究工作提供了一切便利条件。特此致谢!

[参 考 文 献]

- [1] Eldridge D J, Greene R S B. Microbiotic soil crusts: a review of their roles in soil and ecological processes in the rangelands of Australia[J]. Soil Research, 1994, 32(3): 389-415.
- [2] 李新荣, 张元明, 赵允格. 生物土壤结皮研究: 进展, 前沿与展望[J]. 地球科学进展, 2009, 24(1): 11-24.
- [3] 张元明, 陈晋, 王雪芹, 等. 古尔班通古特沙漠生物结皮

- 的分布特征[J]. 地理学报, 2005, 60(1): 53-60.
- [4] Belnap J, Gillette D A. Vulnerability of desert biological soil crusts to wind erosion; The influences of crust development, soil texture, and disturbance[J]. Journal of Arid Environments, 1998, 39(2): 133-142.
- [5] Ponzetti J M, McCune B P. Biotic soil crusts of Oregon's shrub steppe: Community composition in relation to soil chemistry, climate, and livestock activity[J]. The Bryologist, 2001, 104(2): 212-225.
- [6] Bu Chognfeng, Wu Shufang, Xie Yongsheng, et al. The study of biological soil crusts: hotspots and prospects [J]. CLEAN-Soil, Air, Water, 2013, 41(9): 899-906.
- [7] 富远年, 马风云, 刘立超. 不同程度干扰下人为固沙植被区生物结皮对草本植物生长的影响[J]. 水土保持研究, 2011, 18(5): 87-95.
- [8] 李守中. 沙坡头人工植被固沙区生物结皮的生态水文功能研究[D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2005.
- [9] Warren S D, Eldridge D J. Biological soil crusts and livestock[M]// Belnap J, Lange O L (eds). Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management. Berlin: Springer, 2003: 401.
- [10] Hernandez R R, Sandquist D R. Disturbance of biological soil crust increases emergence of exotic vascular plants in California sage scrub [J]. Plant Ecology, 2011, 212(10): 1709-1721.
- [11] 李守中, 肖洪浪, 宋耀选, 等. 腾格里沙漠人为固沙植被区生物结皮对降水的拦截作用[J]. 中国沙漠, 2002, 22(6): 612-616.
- [12] Liu Lichao, Song Yaouxuan, Gao Yanhong, et al. Effects of microbiotic crusts on evaporation from the revegetated area in a Chinese desert[J]. Soil Research, 2007, 45(6): 422-427.
- [13] 熊好琴, 段金跃, 王妍, 等. 毛乌素沙地生物结皮对水分入渗和再分配的影响[J]. 水土保持研究, 2011, 18(4): 82-87.
- [14] 梁少民, 吴楠, 王红玲, 等. 干扰对生物土壤结皮及其理化性质的影响[J]. 干旱区地理, 2006, 28(6): 818-823.
- [15] 吴楠, 梁少民, 王红玲, 等. 动物践踏干扰对生物结皮中微生物生态分布的影响[J]. 干旱区研究, 2006, 23(1): 50-55.
- [16] 吴永胜, 哈斯. 毛乌素沙地南缘沙丘表面径流特征[J]. 科学通报, 2012, 56(34): 2917-2922.
- [17] 张克斌, 卢晓杰, 李瑞. 北方农牧交错带沙地生物结皮研究[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(4): 147-151.
- [18] Duan Zhenghu, Xiao Honglang, Li Xinrong, et al. Evolution of soil properties on stabilized sands in the Tengger Desert, China[J]. Geomorphology, 2004, 59(1/4): 237-246.
- [19] Malam Issa O, Défarge C, Trichet J, et al. Microbiotic soil crusts in the Sahel of Western Niger and their influence on soil porosity and water dynamics[J]. Catena, 2009, 77(1): 48-55.
- [20] 杜建会, 严平, 展秀丽, 等. 民勤绿洲白刺灌丛沙堆不同演化阶段表面抗蚀性及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2008, 19(4): 763-768.

(上接第 4 页)

- [8] Richardson C W, Foster G R, Wright D A. Estimation of erosion index from daily rainfall amount [J]. Transactions of the ASAE, 1983, 26(1): 153-157.
- [9] 谢云, 章文波. 用日雨量和雨强计算降雨侵蚀力[J]. 水土保持通报, 2001, 21(6): 53-56.
- [10] 章文波, 谢云, 刘宝元. 用雨量和雨强计算次降雨侵蚀力[J]. 地理研究, 2002, 21(3): 384-389.
- [11] 王万忠. 黄土地区降雨侵蚀力 R 指标的研究[J]. 中国水土保持, 1987(12): 34-40.
- [12] 周伏建, 黄炎和. 福建省降雨侵蚀力指标 R 值[J]. 水土保持学报, 1995, 9(1): 13-18.
- [13] 黄炎和. 闽南地区的土壤侵蚀与治理[D]. 福州: 福建师范大学, 2001.
- [14] 福建省水利厅. 2012 年福建省水土保持公报 [EB/OL]. (2013-11-30) [2014-06-01]. http://www.fjwater.gov.cn/html/7/865/107489_201472320.html.
- [15] 于东升, 史学正, 何圆球, 等. 红壤生态试验站的降雨侵蚀力及其特征[M]. 红壤生态系统研究: 第五集. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- [16] 高翠, 查轩, 黄少燕. 闽西典型红壤区降雨侵蚀力变化特征研究[J]. 水土保持研究, 2013, 20(2): 33-37.
- [17] 张坤, 洪伟, 吴承祯, 等. 基于地统计学和 GIS 的福建省降雨侵蚀力空间格局[J]. 山地学报, 2009, 27(5): 538-544.
- [18] 曹洁萍, 迟道才, 武立强, 等. Mann—Kendall 检验方法在降水趋势分析中的应用研究[J]. 农业科技与装备, 2008, 179(5): 35-37.