

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第9期

Vol.38 No.9

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中国国道和省道机动车尾气排放特征	王人洁,王堃,张帆,高佳佳,李悦,岳涛(3553)
北偏西大风对北京冬季生物气溶胶的影响	闫威卓,王步英,Oscar Fajardo Montana,蒋靖坤,郝吉明(3561)
不同空气质量等级下环境空气颗粒物及其碳组分变化特征	方小珍,吴琳,张静,李怀瑞,毛洪钧,宋从波(3569)
大气颗粒物及降尘中重金属的分布特征与人体健康风险评价	王永晓,曹红英,邓雅佳,张倩(3575)
2014年6月南京大气复合污染观测	郝建奇,葛宝珠,王自发,张祥志,汤莉莉,徐丹卉(3585)
嘉兴市不同天气条件下大气污染物和气溶胶化学组分的分布特征	王红磊,沈利娟,唐倩,吕升,田旭东,李莉,张孝寒(3594)
应用扩散管测量霾污染期间大气氮硫化合物浓度的方法	田世丽,刘学军,潘月鹏,周焱博,许稳,王跃思(3605)
福建省地级市人为源活性氮排放及其特征分析	张千湖,高兵,黄葳,颜晓妹,崔胜辉(3610)
珠三角某高校室内灰尘重金属含量水平、来源及其健康风险评价	蔡云梅,黄涵书,任露陆,张艳林(3620)
贵金属和助剂负载量对柴油公交车 CDPF 颗粒净化性能的影响	谭丕强,仲益梅,郑源飞,楼狄明,胡志远(3628)
东营市北部海域沉积物中重金属的分布、来源及生态风险评价	刘群群,孟范平,王菲菲,崔鸿武,王曰杰(3635)
基于 MERIS 影像的洪泽湖叶绿素 a 浓度时空变化规律分析	刘阁,李云梅,吕恒,牟蒙,雷少华,温爽,毕顺,丁潇蕾(3645)
太湖蠡河小流域水质的空间变化特征及污染源解析	连慧姝,刘宏斌,李旭东,宋挺,雷秋良,任天志,武淑霞,李影(3657)
黄河高村至利津河段水体和沉积物中不同形态磷的分布特征	赵瞰,贾雁翔,姜兵琦,梅翔宇,李敏(3666)
三峡澎溪河流域消落区与岸边土壤磷形态特征	黄俊杰,王超,方博,冯磊,方芳,李哲,郭劲松(3673)
网湖沉积物正构烷烃分布特征及其记录的环境变化	沈贝贝,吴敬禄,曾海鳌,张永东,金苗(3682)
高地下水位地区透水停车场的水文控制效果	金建荣,李田,王圣思,陈子隽,周佳雯(3689)
北方典型设施蔬菜种植区地下水水质特征	于静,虞敏达,蓝艳,何小松,李敏(3696)
垃圾填埋水溶性有机物组成、演化及络合重金属特征	肖骁,何小松,席北斗,高如泰,李丹,张慧,崔东宇,袁志业(3705)
潜流人工湿地基质结构与微生物群落特征的相关性	李振灵,丁彦礼,白少元,李雪芬,游少鸿,解庆林(3713)
滑石矿开采对着生藻群落结构和水环境的影响	臧小苗,张远,林佳宁,王书平,高欣,赵茜,王靖淇(3721)
高铵条件下绿狐尾藻的生理与氮磷吸收特征	刘少博,冉彬,曾冠军,李宝珍,朱红梅,刘锋,肖润林,吴金水(3731)
活性炭吸附对藻类有机物的去除及其消毒副产物的控制	苗雨,翟洪艳,于珊珊,张婧,史常香(3738)
石墨烯凝胶电极的制备及电吸附 Pb^{2+} 的性能	王瑶,吉庆华,李永峰,胡承志(3747)
电流密度对 BDD 电极电化学矿化吡啶的影响与机制	张佳维,王婷,郑彤,蒋欢,倪晋仁(3755)
黄铁矿光化学氧化降解微囊藻毒素-LR 的机制	周薇,方艳芬,张钰,吴春红,黄应平(3762)
双氧水协同生化法强化处理印染废水	岳秀,唐嘉丽,于广平,吉世明,刘竹寒(3769)
基于 ABR-MBR 组合工艺不同进水 C/N 比对反硝化除磷性能的影响机制	吴鹏,程朝阳,沈耀良,赵诗惠,吕亮(3781)
利用好氧颗粒污泥持续增殖启动高性能亚硝化反应器	高军军,钱飞跃,王建芳,陈希,沈耀良,张泽宇,闫俞廷(3787)
零价铁自养反硝化过程活性污泥矿化及解决措施	张宁博,李祥,黄勇,张文静(3793)
低氧污泥丝状菌膨胀的呼吸图谱特征分析	马智博,李志华,杨成建,贺春博,秋亮,张晶(3801)
市政污泥接种焦化废水好氧降解能力及微生物群落演替的响应分析	刘国新,吴海珍,孙胜利,胡肖怡,吴晓英,陈华勇,范一文,胡成生,韦朝海(3807)
高效反硝化细菌的快速培养及群落结构多样性分析	孟婷,杨宏(3816)
两座污水处理系统中细胞态和游离态抗生素抗性基因的丰度特征	张衍,陈吕军,谢辉,李奥林,代天娇(3823)
生物炭对土壤 CH_4 、 N_2O 排放的影响	周凤,许晨阳,王月玲,林云,王强,张彤彤,耿增超(3831)
江西省耕地土壤碳氮比空间变异特征及其影响因素	江叶枫,郭熙,孙凯,饶磊,李婕,王澜珂,叶英聪,李伟峰(3840)
碳酸钙与生物炭对酸化菜地土壤持氮能力的影响	俞映惊,杨林章,Alfred Oduor Odindo,薛利红,何世颖,段婧婧(3851)
黄土丘陵区小流域不同整地措施长期影响下的土壤水力学特性	冯天骄,卫伟,陈利顶,陈蝶,干洋,杨磊(3860)
有机碳含量对多环芳烃在土壤剖面残留及迁移的影响	费佳佳,张枝焕,万甜甜,何奉朋(3871)
酸雨区不同用地类型土壤有效态 Cd 含量季节变化及关键影响因子	刘孝利,曾昭霞,铁柏清,叶长城,周俊驰,雷鸣(3882)
陕西潼关冶金污染土壤的修复评价及应用潜力	王姣,肖然,李荣华,宁西翠,蒋顺成,李晓龙,张增强,沈锋(3888)
甘肃白银东大沟铅锌铜复合污染场地水泥固化稳定化原位修复	吕浩阳,费杨,王爱勤,阎秀兰,李发生,李春萍,杜延军,郑梓铭(3897)
设施栽培对土壤与蔬菜中 PAHs 污染特征及其健康风险评价	金晓佩,贾晋璞,毕春娟,王薛平,郭雪,陈振楼,仇新莲(3907)
铜-铅复合污染下 AM 真菌对玉米生长和铜、铅吸收的影响	常青,郭伟,潘亮,王起凡,周昕南,杨亮,李娥(3915)
秸秆还田对水稻镉积累及其亚细胞分布的影响	段桂兰,王芳,岑况,王伯勋,程旺大,刘跃川,张红梅(3927)
<i>Pantoea</i> sp. IMH 介导土壤中砷的形态转化	张林,卢金锁(3937)
生物炭对土壤中重金属铅和锌的吸附特性	王红,夏雯,卢平,布雨薇,杨浩(3944)
浒苔生物炭的特征及其对 Cr(VI) 的吸附特点和吸附机制	陈友媛,惠红霞,卢爽,王报英,王志婕,王楠(3953)
灼烧净水污泥对外源磷的吸附和固定作用	于胜楠,李勇,李大鹏,黄勇(3962)
污泥生物炭制备吸附陶粒	李杰,潘兰佳,余广炜,汪印,尤甫天,谢胜禹(3970)
石墨相氮化碳-碘氧化铋层状异质结的构建及其光催化杀菌性能	黄建辉,林文婷,谢丽燕,陈建琴(3979)
《环境科学》征稿简则(3859)	《环境科学》征订启事(3952)
信息(3644, 3688, 3768)	

黄土丘陵区小流域不同整地措施长期影响下的土壤水力学特性

冯天骄^{1,2}, 卫伟^{1*}, 陈利顶¹, 陈蝶^{1,2}, 于洋^{1,3}, 杨磊¹

(1. 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国水利水电科学研究院泥沙研究所, 水利部水土保持生态工程技术研究中心, 北京 100048)

摘要: 水分是维持旱区生态系统健康与可持续性的关键因子。整地措施能够重塑地表微地形, 利于旱区雨水收集、侵蚀防控和促进植被恢复, 整地长期影响下的土壤水力学性质是本文的研究重点。以定西龙滩流域为研究区, 通过野外采样与室内实验相结合, 分析植被恢复过程中典型整地措施(鱼鳞坑、反坡台)的土壤水分时空分布、土壤水分特征曲线和水分常数, 并辅以自然坡面为对照定量评价工程措施的土壤水力学特性。结果表明: ① 整地可以有效提高土壤水分含量。整地后土壤水分体积分数平均提高 1.883%, 相比自然坡面高出了 22.62%。反坡台和鱼鳞坑整地后, 土壤水分含量分别提高了 29.69% 和 15.55%。② 与对照相比, 鱼鳞坑和反坡台的饱和含水量分别提高了 7.52% 和 4.24%, 有效水含量分别提高了 4.74% 和 11.40%, 整地措施能够提高土壤持水力和供水力, 改善土壤水力学性质。③ 整地措施对表层土壤持水能力和供水能力的影响较深层大, 与对照相比, 鱼鳞坑和反坡台表层土壤(0~20 cm)有效水分提高了 38.75% 和 23.84%, 而深层(60~80 cm)有效水分与自然坡面差异只有 3.34% 和 3.85%; 土壤水分差异也随着土层深度而减少。本研究定量评价了不同整地方式和自然坡面的土壤水分特性, 其结果期望为脆弱生态系统植被恢复和水土资源管理提供科学依据。

关键词: 黄土高原; 整地方式; 土壤水分特征曲线; 土壤水力特性; 比水容量

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)09-3860-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201702126

Comparison of Soil Hydraulic Characteristics Under the Conditions of Long-term Land Preparation and Natural Slope in Longtan Catchment of the Loess Hilly Region

FENG Tian-jiao^{1,2}, WEI Wei^{1*}, CHEN Li-ding¹, CHEN Die^{1,2}, YU Yang^{1,3}, YANG Lei¹

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Research Center on Soil and Water Conservation of the Ministry of Water Resources, Department of Sediments Research, China Institute of Water Resource and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract: Soil moisture plays a crucial role in maintaining the health and sustainability of dryland ecosystems. Terracing and other similar land preparations can reshape the natural slope and change underlying surface into different micro-landforms, which are significant for rainwater harvesting, erosion control, and vegetation promotion in arid regions. In this study, the Longtan Watershed in Dingxi region was selected as the study area. Based on *in situ* experiments, soil sampling analysis, and modeling simulation, the effects of land preparation and artificial vegetation (Fish-scale pit/Adverse grade tableland-*Platycladus orientalis*) on soil moisture characteristics curves and soil moisture constants were quantitatively analyzed. ① The land preparations could effectively improve the soil moisture content in the study catchment of Loess Plateau. Compared with natural slope, soil water content of land preparations increased by 1.883% (volume fraction) on average and fish-scale pit method and adverse grade tableland method enhanced the soil moisture by 29.69% and 15.55%, respectively. ② Compared with the natural slope, fish-scale pit and adverse grade tableland could significantly improve the soil hydraulic properties. After carrying out the land preparations, saturated soil water content and soil properties such as field capacity increased by 4.24%-11.40%, suggesting that land preparations can improve soil moisture and water supply ability. ③ Surface soil moisture characteristics were better than those of the underlying soil layers after land preparations. Compared with the natural slope, fish-scale pit and adverse grade tableland's shallow soil layer (0-20 cm) increased the moisture by 38.75% and 23.84%, respectively, whereas in the deep layer (60-80 cm) the increment of moisture were only 3.34% and 3.85%, respectively. This research provides scientific basis for vegetation restoration and land improvement in fragile semi-arid ecosystems.

Key words: Loess Plateau; land preparation; soil water characteristic curve; soil hydraulic characteristics; specific water capacity

收稿日期: 2017-02-21; 修订日期: 2017-04-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371123, 41501091); 国家重点研发计划项目(2016YFC0501701); “十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAC01B02); 中国科学院青年创新促进会项目

作者简介: 冯天骄(1991~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为生态水文学, E-mail: fengtianjiaobest@sina.cn

* 通信作者, E-mail: weiwei@rcees.ac.cn

黄土高原地区生态环境脆弱,降雨量低,土壤水分严重缺乏,水分是生态恢复的限制因子^[1,2]。然而,水分含量的大小不能完全说明其水分亏缺状态,所以研究土壤水分有效性和土壤水分持水供水特性有利于认清黄土高原土壤水分丰缺和有效程度的真实状态,从而更合理地采取整地措施和植被建设等生态恢复手段^[3]。土壤持水和供水特性决定土壤水分有效性,即土壤对水分和植物需水的保持和供给能力^[2]。为保持水土资源和生态环境,坡改梯整地措施是主要的人工生态恢复手段。整地通过改造下垫面,减短了径流路径,增加了土壤入渗,并且减少土壤蒸发,改善土壤性质,从而达到保持水土的目的^[4]。黄土高原整地措施的保水效应的相关研究表明,该地区整地后的持水性及抗旱力增强,整地能够有效影响土壤水分特性^[5]。同时发现整地后不同深度土壤的持水和供水特性存在一定变异性^[6],并说明土壤物理性黏粒及土壤结构是造成土壤水分特性垂直变异的主要因素。

为了明确整地方式对土壤水分影响的内在机制,水分特征曲线是分析土壤水力学性质的有效方法,Kargas 等^[7]利用水分特征曲线对比不同土地利用方式的土壤水分的持水能力,发现不同整地方式的保水能力和水分扩散能力并不相同,但均优于对照(裸地)。还有学者对比分析了水分常数垂向变化,发现不同土地利用方式的土壤水力学性质存在较大空间差异性^[8]。在亚热带红壤区,有研究表明以坡改梯为主体的整地方式能够增加土壤贮水量,提高土壤持水能力,减轻土壤退化,并有利于植被更有效抵御短期干旱^[9]。

在黄土高原,人们也开展了土壤水分特性的实验研究^[4,10-16],但大多数是基于不同质地的土壤或是不同种类林地的水分特性研究^[13-16]。整地措施作为植被恢复过程中的主要技术措施之一,能够有效拦蓄径流,保持水土,提高植被成活率^[4]。然而关于其作用的内在机制,特别是对整地措施开展后的持水、供水性质的内在影响,并未有足够的关注。基于此,本文以甘肃定西龙滩小流域内典型整地措施(鱼鳞坑和反坡台)及植被恢复树种(侧柏)为研究对象,并辅以相同植被的自然坡面(未整地)作为对照,对工程措施实施多年后的土壤水力学特性进行对比分析,探讨工程措施对土壤水分的有效性和土壤持水能力的影响,以期为黄土沟壑区植被恢复与水土资源管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区和实验小区设计概况

龙滩流域(35°43'~35°46'N, 104°27'~104°31'E)地处甘肃省定西市西北部,属于典型的半干旱黄土丘陵区小流域,流域面积 16.1 km²,海拔 1 800~2 200 m。该区属半干旱大陆性气候,据长期气象数据(1958 年至今),平均气温 6.8℃,平均无霜期 152 d,平均日照时数 2 052 h; 年均降水量 386.3 mm。该地区植被生长季为每年 5~10 月,降雨主要集中在 7~9 月,且多暴雨,潜在蒸发量为 1 649.0 mm,年平均相对湿度 72%,水分亏缺严重^[15,16]。

为改善生态环境,当地从 20 世纪 50 年代起就开展了大规模植被恢复和坡面地形改造工程。反坡台、鱼鳞坑能够使土壤疏松,拦蓄地表径流,加强入渗作用,提高水分利用率,是流域内开展植被恢复的主要整地措施。在坡面尺度,进行侧柏鱼鳞坑、侧柏反坡台和侧柏自然坡面小区的布设,各小区的基本特征见表 1。

1.2 数据收集

1.2.1 水分数据的测定

土壤水分含量采用便携式时域反射仪(time domain reflectometry, TDR)分不同土壤深度(0~5、5~10、10~20、20~30、30~40、40~60、60~80、80~100 cm)在两年生长季内(2014 年 5 月 1 日~2015 年 10 月 31 日)进行测定,每两周测定一次。分别在不同整地方式和自然坡面样地内沿坡面布设监测样点,每个样地每层测定 3 个样点作为重复。在用便携式时域反射仪进行测定前,采用烘干法对 TDR 测定的土壤含水量进行校正,得出二者的回归方程 $y = 1.1805x - 0.3851$, $R^2 = 0.99$, y 为采用烘干法测定的土壤含水量乘以土壤容重, x 为时域反射仪测定的土壤含水量。与此同时,在流域内布设自动气象站(Vantage Pro 2)记录生长季内的降水量。

1.2.2 土壤样品的采集及分析

在 2015 年生长季采集土壤样品,方法是沿小区坡面上、中、下坡位分四层(0~20、20~40、40~60、60~80 cm)进行取样,每层 3 个重复,采用自封袋保存取回实验室,备用与测定土壤机械组成;同时采用容重环刀和 1 cm 小环刀,按照相同深度采集土壤样品,供测土壤水分特征曲线。

土壤机械组成采用激光粒度仪(Mastersizer 2000)进行测定,测定方法以及前处理参照文献

[17]. 土壤水分特征曲线采用砂箱法结合水吸力膜 (~0.008 MPa),压力膜法可测定 0.01 ~ 1.5 MPa 水吸力下土壤水分情况(图1).

表 1 小区的基本情况¹⁾

Table 1 Basic characteristics of the plots

小区名称	侧柏反坡台	侧柏鱼鳞坑	侧柏自然坡面对照
小区面积/m ²	100	100	100
坡向	东偏南	南	南
坡度/(°)	34	39	39
坐标	N 35°43'30.57", E 104°29'29.71"	N 35°44'11.01"E, 104°30'24.94"	N 35°44'11.01"E, 104°30'24.94"
容重/g·cm ⁻³	1.21 ± 0.05	1.17 ± 0.04	1.24 ± 0.02
树高/m	1.70 ± 0.48	1.49 ± 0.38	1.35 ± 0.36
胸径/cm	4.72 ± 1.02	3.31 ± 0.37	2.86 ± 0.46
林龄/a	49	49	49
整地描述	将 4.0 m 长的坡面径流集中到 0.6 ~ 1.0 m 的台面,反坡 5° ~ 8°	鱼鳞坑直径、长、宽分别为 135、80、50 cm	—
整地年份	1957	1957	—
冠层郁闭度/%	40	35	35
主要植被	百里香(<i>Thymus mongolicus</i>)、北方獐牙菜(<i>Swertia diluta</i>)、长芒草(<i>Stipa bungeana</i>)、披针叶野决明(<i>Thermopsis lanceolata</i>)	束伞亚菊(<i>Ajania parviflora</i>)、阿尔泰狗娃花(<i>Heteropappus altaicus</i>)、二裂委陵菜(<i>Potentilla bifurca</i>)、长芒草(<i>Stipa bungeana</i>)	阿尔泰狗娃花(<i>Heteropappus altaicus</i>)、披针叶野决明(<i>Thermopsis lanceolata</i>)、长芒草(<i>Stipa bungeana</i>)
黏粒/%	21.96 ± 3.70	8.20 ± 0.73	20.96 ± 0.48
粉粒/%	67.79 ± 2.95	70.12 ± 3.71	55.62 ± 2.54
砂粒/%	10.25 ± 0.88	21.68 ± 3.98	23.42 ± 1.85

1) 土壤机械组成分级标准按国际制分类:黏粒 (<0.002 mm,%),粉粒 (0.02 ~ 0.002 mm,%)和砂粒 (2 ~ 0.02 mm,%),并且表中数值为 0 ~ 100cm 土壤性状的平均含量



图 1 土壤水分特征曲线测定装置

Fig. 1 Soil water characteristics curve measurement device

1.3 数据处理方法

1.3.1 水分特征曲线的模拟

采用 van Genuchten 模型拟合水分特征曲线

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r)[1 + (\alpha |h|)^n]^{-m} \quad (1)$$

式中, θ 为含水量(% ,体积分数); θ_r 为残留含水量(% ,体积分数); θ_s 为饱和含水量(% ,体积分数); h 为负压值; α 、 n 、 m 为经验拟合参数; $m = 1 - 1/n$ ^[18].

1.3.2 土壤比水容量的计算

比水容量是衡量土壤水分对植物的有效性和反映土壤持水性能的一个重要指标. 由模拟公式可

知,比水容量的方程是将 van Genuchten 拟合方程以土壤水吸力为自变量求导后的斜率值,所以根据各曲线的拟合方程,比水容量方程即:

$$C(h) = - \frac{d\theta}{dh} = \frac{(\theta_s - \theta_r)m n \alpha |\alpha h|^{n-1}}{[1 + |\alpha h|^n]^{m+1}} \quad (2)$$

式中, θ 为体积含水量(% ,体积分数); θ_r 为残留含水量(% ,体积分数); θ_s 为饱和含水量(% ,体积分数); h 为负压值; α 、 n 、 m 为经验拟合参数(或曲线性状参数); $m = 1 - 1/n$.

1.3.3 数据统计分析

基于收集的整地和自然坡面条件下的土壤水分

含量,计算各月份和深度的平均值和标准差,用于表示水分的时间和深度分布,以及进一步地分析.通过 K-S 检验数据符合正态分布,所以显著性分析采用单因素 ANOVA 方法;其中个别未通过正态分布的数据组的显著性检验使用 Kruskal-Wallis 检测.本文数据统计和分析使用 SPSS 20.0 软件,作图使用 SigmaPlot 12.5.

2 结果与分析

2.1 相同降雨条件下整地方式与自然坡面条件下土壤水分含量的比较

2.1.1 研究区 2014 ~ 2015 年生长季降雨特征

龙滩流域 2014 ~ 2015 年生长季降雨分布如图 2 所示,2014 和 2015 年的生长季降雨总量分别为 501.6 mm 和 323.2 mm,分别可以代表丰水年和平水年的降雨情况.其中,两年内 5 月到 10 月的平均月降雨量分别为 60.5、67.5、100、76.6、75.2 和 32.6 mm,由此可见生长季中期(7 ~ 9 月)的降雨最高,占生长季总雨量的 61%;其次是生长季初期(5、6 月),占生长季总雨量的 31%;而生长季末期(10 月)的降雨量最少,仅占总雨量的 8%.

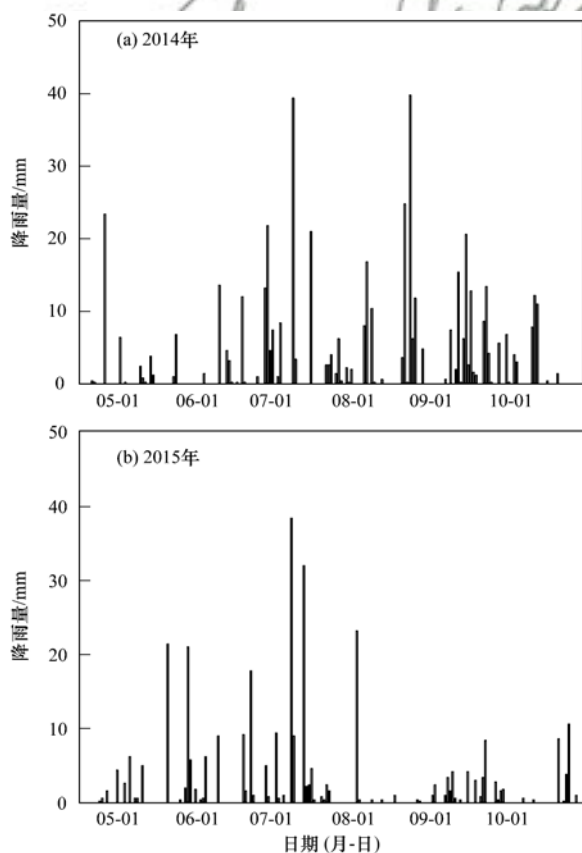
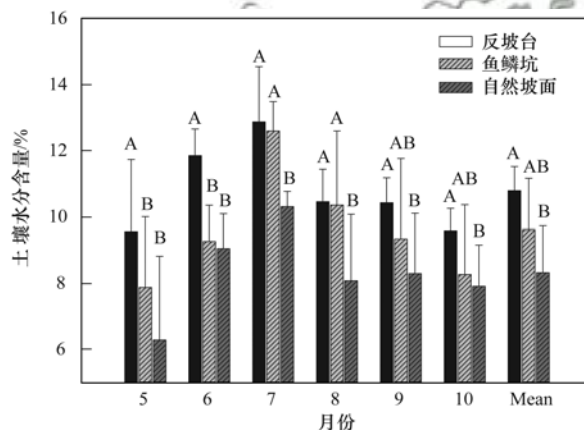


图2 龙滩流域 2014 ~ 2015 年日降雨量分布

Fig. 2 Long tan catchment daily rainfall characteristics in two years(2014-2015) during growing season

2.1.2 研究区 2014 ~ 2015 年生长季土壤水分含量的比较

2014 ~ 2015 年生长季各月份平均水分含量如图 3 所示,生长季内各月水分含量呈现增加后减少的趋势,并在 7 月达到最高值. 2 种典型整地方式和自然坡面的平均土壤水分含量由高到低分别是反坡台(10.795%) > 鱼鳞坑(9.618%) > 自然坡面(8.324%),相比自然坡面,反坡台和鱼鳞坑整地后土壤水分含量分别提高 29.69% 和 15.55%. 整地后土壤水分平均提高了 1.883%,相比自然坡面显著高出了 22.62% ($P < 0.05$). 此外,对比两种整地方式各月份的水分含量,反坡台均高于鱼鳞坑,其中在 5、6 月差异显著($P < 0.05$),6 月两者差异达到最大值 2.583% (反坡台比鱼鳞坑高 27.87%),在 7 月到 10 月差异不显著($P > 0.05$),即在降雨量较少的生长季初期,反坡台的水分含量优势更加明显.



图中各月份水分数据是 2014 ~ 2015 年生长季内观测的平均数据,不同大写字母表示不同整地方式和自然坡面在各月份水分含量的差异显著 $P < 0.05$ (One-way ANOVA)

图3 整地方式和自然坡面条件下各月份的水分含量比较

Fig. 3 Soil water content monthly variations among different land preparations and nature slope

如表 2 所示,平均土壤水分含量按深度的变化规律是由表层逐渐增加,到 20 ~ 40 cm 左右达到峰值,之后土壤水分随土壤深度的增加而逐渐减少.对比不同整地方式和自然坡面条件下的土壤水分,整地后(反坡台、鱼鳞坑)的土壤水分含量均显著高于自然坡面($P < 0.05$);同时可以发现 30 cm 为界限,30 cm 以上的土壤水分差异较大,而 30 ~ 100 cm 的土壤水分差异较小,例如在 10 ~ 20 cm 是整地前后差异的最大值,整地后平均提高了 65.37% 的水分含量,而到深层 60 ~ 80 cm 和 80 ~ 100 cm,反坡台和鱼鳞坑相比自然坡面的土壤水分差异分别只有 0.01%、0.53%、0.06% 和 1.02%.

表 2 整地和自然坡面条件下不同土层的水分含量比较¹⁾/%

Table 2 Comparison of soil water content with land preparation and natural slope in different soil horizons/%

深度/cm	反坡台	鱼鳞坑	自然坡面
0~5	10.17±2.86 a	8.01±2.48 b	6.20±0.37 b
5~10	11.77±3.05 a	9.63±2.44 ab	7.16±0.30 b
10~20	12.09±2.84 a	10.50±2.21 ab	6.83±0.22 b
20~30	11.20±2.80 a	11.07±2.48 ab	8.34±0.21 b
30~40	10.40±2.30 a	10.53±3.01 a	9.67±0.20 b
40~60	10.39±1.38 a	10.63±3.02 a	9.51±0.19 b
60~80	9.67±0.74 b	10.21±2.19 a	9.68±0.35 b
80~100	9.26±0.41 b	10.22±1.82a	9.20±0.31 b

1)表中各深度水分数据是2014~2015年生长季内观测的平均数据,不同小写字母表示不同整地方式和自然坡面在各土层水分含量的差异显著 $P<0.05$ (One-way ANOVA)

2.2 整地方式和自然坡面土壤水分特征曲线对比

由表3可知,van Genuchten 方程拟合的土壤水分特征曲线,整地后水分含量有所提高,不同水吸力梯度下土壤含水量结果表现为:鱼鳞坑>反坡台>坡面对照;同一整地和植被覆盖条件下表层土(0~20 cm和20~40 cm)>底层土(40~80 cm)。在各水吸力梯度下,鱼鳞坑和反坡台与自然坡面相比水分含量分别平均提高了10.53%和5.26%,说明整地后两种工程措施都有较好的保水功效。由图4可知,整地后的土壤表层相比深层有更明显的水分提

高作用,与自然坡面相比,鱼鳞坑和反坡台表层(0~20 cm)水分含量分别提高了32.1%和10.5%,而底层土(60~80 cm)水分含量都只提高了5.3%,整地对表层土壤的水分提高作用优于底层土。

2.3 整地方式和自然坡面的土壤持水性能比较

土壤水分有效性常数的测定结果见图5。

如图5所示,该地区的土壤水分常数比较低,土壤水分保持能力较弱,饱和含水量最大值只有 $38.93\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$,有效水含量在 $10\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ 左右。对比整地前后的土壤水分常数变化,整地后的土壤表层饱和含水量、有效水、田间持水量等水分常数有显著的提高(Kruskal-Wallis H Test, $P<0.05$);整地后相比自然坡面表层0~20 cm饱和含水量可以提高7.9%,有效水分提高了31.30%,其中鱼鳞坑和反坡台表层土壤(0~20 cm)有效水分相比自然坡面分别提高了38.75%和23.84%,而深层(60~80 cm)有效水分与自然坡面差异只有3.34%和3.85%。综上所述,整地之后相比自然坡面,土壤的持水性相对较好,鱼鳞坑和反坡台这两种整地方式均对提高土壤的持水性有积极作用。同时可以发现表层的土壤持水性优于底层土,因为底层土壤水分的差异没有表层明显(Kruskal-Wallis H Test, $P>0.05$)。

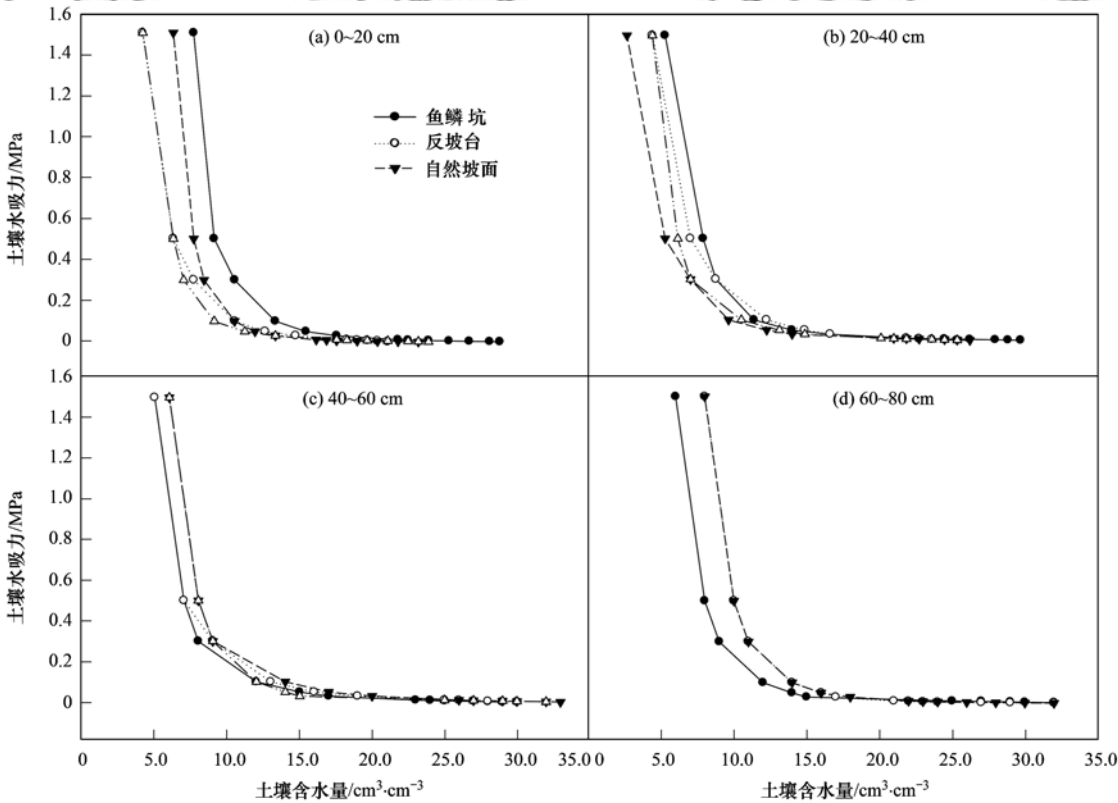


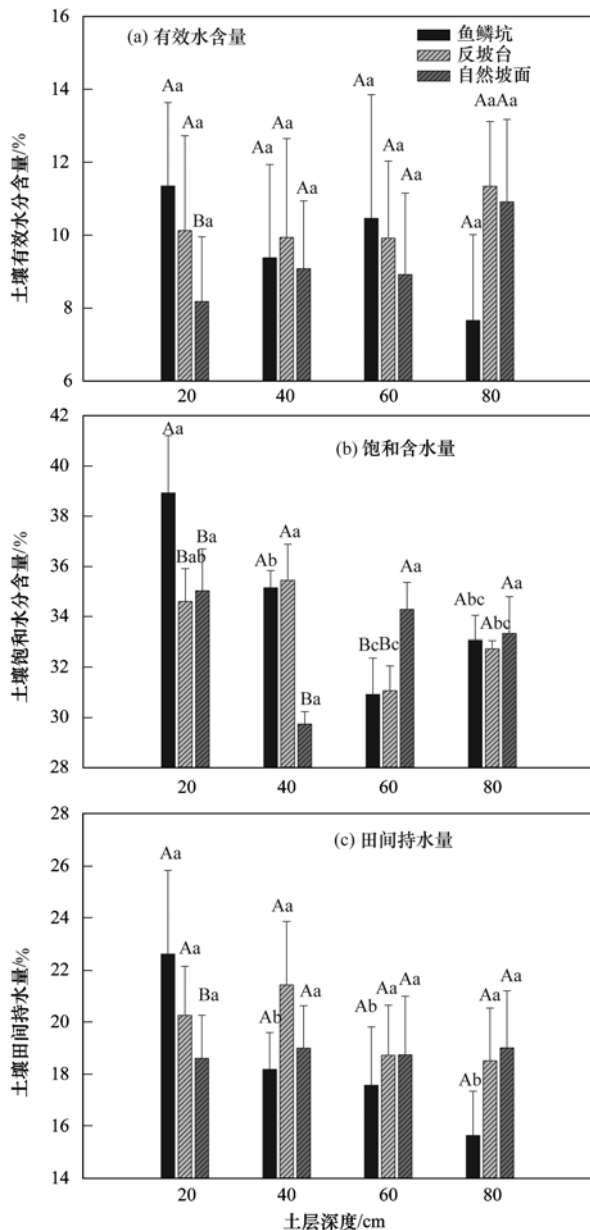
图 4 整地方式和自然坡面条件下的各土层的土壤水分特征曲线

Fig. 4 Soil water characteristics curve of each layer for different land preparations and nature slope

表 3 土壤含水量与土壤水吸力对应关系¹⁾

Table 3 Relationship between soil water content and soil suction																		
小区	深度 /cm	土壤水吸力/MPa												拟合参数				
		0	0.001	0.004	0.008	0.01	0.03	0.05	0.1	0.3	0.5	1.5	SSE	α	n	$\theta_s/\%$	$\theta_r/\%$	r
侧柏鱼鳞坑	0~20	0.39±0.02	0.38±0.01	0.35±0.00	0.33±0.01	0.26±0.04	0.23±0.03	0.20±0.02	0.18±0.01	0.17±0.08	0.11±0.00	0.11±0.01	1.225×10 ⁻³	2.953	1.236	39	1.0	0.988
	20~40	0.35±0.01	0.34±0.01	0.31±0.01	0.28±0.01	0.21±0.03	0.18±0.01	0.15±0.00	0.13±0.01	0.11±0.01	0.09±0.00	0.09±0.01	1.168×10 ⁻³	2.417	1.303	35	0.2	0.987
	40~60	0.31±0.01	0.28±0.02	0.26±0.02	0.25±0.01	0.21±0.03	0.18±0.02	0.14±0.00	0.12±0.01	0.09±0.01	0.08±0.00	0.07±0.01	2.876×10 ⁻³	1.503	1.330	31	0.0	0.971
	60~80	0.33±0.01	0.32±0.03	0.30±0.04	0.28±0.04	0.27±0.12	0.16±0.02	0.13±0.01	0.13±0.06	0.07±0.03	0.09±0.01	0.08±0.01	1.996×10 ⁻²	0.831	1.846	33	0.7	0.870
侧柏反坡台	0~20	0.35±0.02	0.29±0.00	0.28±0.01	0.28±0.00	0.24±0.02	0.20±0.02	0.18±0.00	0.16±0.02	0.13±0.02	0.11±0.00	0.10±0.01	6.741×10 ⁻⁴	0.873	1.317	35	0.0	0.985
	20~40	0.35±0.01	0.34±0.01	0.33±0.01	0.31±0.00	0.25±0.04	0.21±0.02	0.18±0.01	0.11±0.03	0.11±0.01	0.12±0.00	0.11±0.00	8.576×10 ⁻⁴	1.088	1.306	35	0.0	0.974
	40~60	0.31±0.01	0.30±0.02	0.28±0.02	0.27±0.01	0.22±0.03	0.19±0.02	0.16±0.01	0.13±0.01	0.11±0.02	0.10±0.01	0.09±0.00	1.161×10 ⁻³	1.089	1.349	31	0.0	0.972
	60~80	0.33±0.00	0.26±0.01	0.24±0.00	0.23±0.00	0.22±0.03	0.19±0.02	0.15±0.01	0.12±0.02	0.09±0.01	0.08±0.00	0.07±0.00	7.324×10 ⁻³	10.92	1.184	33	0.0	0.900
侧柏自然坡面	0~20	0.31±0.01	0.29±0.00	0.27±0.01	0.26±0.00	0.21±0.02	0.19±0.02	0.16±0.00	0.11±0.02	0.09±0.02	0.08±0.00	0.06±0.01	2.377×10 ⁻³	5.347	1.204	31	0.0	0.967
	20~40	0.30±0.00	0.29±0.01	0.28±0.01	0.27±0.01	0.23±0.01	0.19±0.02	0.17±0.01	0.13±0.00	0.11±0.01	0.10±0.00	0.10±0.01	7.283×10 ⁻⁴	1.064	1.674	30	6.2	0.985
	40~60	0.34±0.01	0.32±0.01	0.30±0.01	0.29±0.00	0.22±0.03	0.19±0.02	0.16±0.01	0.13±0.01	0.11±0.01	0.10±0.00	0.10±0.00	1.391×10 ⁻³	1.456	1.332	34	0.0	0.974
	60~80	0.33±0.01	0.27±0.01	0.25±0.01	0.25±0.00	0.22±0.03	0.19±0.02	0.16±0.01	0.12±0.01	0.10±0.01	0.09±0.01	0.08±0.00	5.521×10 ⁻³	4.862	1.213	33	0.0	0.930

1) 表中 α 、 n 、 m 为经验拟合参数(或曲线性态参数); $m = 1 - 1/n$; θ_s 、 θ_r 分别为饱和含水量和残余含水量; SSE、 r 分别为拟合曲线的误差平方和、相关系数



不同大写字母表示不同整地方式和自然坡面之间的显著差异 ($P < 0.05$, Kruskal-Wallis H Test), 不同小写字母表示整地方式和自然坡面在各土层水分含量的差异显著 ($P < 0.05$, Kruskal-Wallis H Test)

图5 整地方式和自然坡面条件下的各土层的土壤水分常数比较

Fig. 5 Soil water characteristics of each layer for different land preparations and nature slope

2.4 整地方式和自然坡面的土壤供水能力比较

不同条件下土壤比水容量如表4所示。从整体来看,该地区的土壤比水容量较小,土壤供水能力较低。对比不同小区的土壤比水容量,可以看出相比自然坡面,整地后土壤供水能力有一定提升,鱼鳞坑和反坡台在 0.001 MPa 水吸力条件下的 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土层的比水容量分别为 $0.565 \text{ cm}^3 \cdot (\text{cm}^3 \cdot \text{MPa})^{-1}$ 和 $0.475 \text{ cm}^3 \cdot (\text{cm}^3 \cdot \text{MPa})^{-1}$,而自然坡面在该土层比

水容量只有 $0.417 \text{ cm}^3 \cdot (\text{cm}^3 \cdot \text{MPa})^{-1}$; 另一方面,不同土层的土壤供水能力对比显示,土壤表层的供水能力大于土壤底层的供水能力,特别是在高水吸力条件下,如 0.5 MPa 时,侧柏鱼鳞坑和侧柏反坡台底层 ($60 \sim 80 \text{ cm}$) 比水容量分别为 $2.27 \times 10^{-4} \text{ cm}^3 \cdot (\text{cm}^3 \cdot \text{MPa})^{-1}$ 和 $3.74 \times 10^{-4} \text{ cm}^3 \cdot (\text{cm}^3 \cdot \text{MPa})^{-1}$,而表层 ($0 \sim 20 \text{ cm}$) 比水容量分别是 $5.83 \times 10^{-4} \text{ cm}^3 \cdot (\text{cm}^3 \cdot \text{MPa})^{-1}$ 和 $5.71 \times 10^{-4} \text{ cm}^3 \cdot (\text{cm}^3 \cdot \text{MPa})^{-1}$ 。由此可见相比自然坡面,整地有效提升了土壤供水能力,并在表层提升作用最明显。

3 讨论

3.1 整地措施对土壤水分的影响

在黄土高原干旱和半干旱地区,为了防治水土流失,保护水土资源,整地是最主要的人工方式^[19],它对土壤水分影响主要通过对水分收集和水分保持两个方面。一方面,在降雨过程中,整地对下垫面的修整,改变了径流路径,拦蓄地表径流,即缩短径流线且减少了径流量,而通过对土壤的翻动有利于土壤导水性的提升,从而增加了水分入渗^[4,20]。另一方面,在干旱条件下土壤水分散失的主要途径是土壤蒸发,而整地通过坡改梯的方式减少了土壤蒸发面积,有利于水分的保持,同时整地后由于对土壤的松动,有利于土壤结构和土壤性质的改善,也进一步提升了土壤的保水功能^[21]。

本研究发现,在相同气象数据条件下(图1),基于两年的不同整地方式和自然坡面条件下的土壤水分含量观测,整地后的土壤水分含量高于自然坡面,其中反坡台比自然坡面高出 2.471% ($P < 0.05$),鱼鳞坑比自然坡面高出 1.294% (图3),整地后平均比自然坡面水分提高 22.62% ,说明了整地对保持土壤水分的有效性,这一点与诸多研究结果相似^[22~24]。反坡台小区的土壤水分高于鱼鳞坑,两者平均相差 1.177% ,但差异并不显著 ($P > 0.05$)。具体来讲,根据 $2014 \sim 2015$ 年的降雨分布特征(图1),在降雨较少的干旱的生长季初期(5、6月)两种整地方式的差异显著,而生长季中后期(7~10月)随着降雨量的增加(图2),两种整地方式的土壤水分含量差异不显著,相比自然坡面的保水效果也不如生长季初期好(如10月整地小区与自然坡面的最小差异只有 0.35%)。说明在干旱条件下反坡台的保水效果更好,而在降雨较多时,鱼鳞坑也有较好的保水效果。这是因为鱼鳞坑整地方式的特点是在

表 4 土壤水吸力与土壤比水容量对应关系/(cm³·MPa)⁻¹
Table 4 Soil specific water capacity of the plots/cm³·(cm³·MPa)⁻¹

小区	深度/cm	土壤水吸力/MPa											
		0.001	0.003	0.004	0.006	0.008	0.01	0.03	0.05	0.1	0.3	0.5	1.5
侧柏鱼鳞坑	0~20	5.65×10 ⁻¹	3.56×10 ⁻¹	1.75×10 ⁻¹	8.12×10 ⁻²	6.79×10 ⁻²	5.56×10 ⁻²	1.75×10 ⁻²	9.64×10 ⁻³	4.19×10 ⁻³	1.09×10 ⁻³	5.83×10 ⁻⁴	1.50×10 ⁻⁴
	20~40	5.66×10 ⁻¹	3.55×10 ⁻¹	1.74×10 ⁻¹	8.09×10 ⁻²	6.88×10 ⁻²	5.66×10 ⁻²	1.74×10 ⁻²	9.31×10 ⁻³	3.88×10 ⁻³	9.42×10 ⁻⁴	4.85×10 ⁻⁴	1.16×10 ⁻⁴
	40~60	4.80×10 ⁻¹	6.46×10 ⁻²	5.68×10 ⁻²	5.60×10 ⁻²	5.56×10 ⁻²	4.80×10 ⁻²	1.68×10 ⁻²	9.20×10 ⁻³	3.84×10 ⁻³	9.15×10 ⁻⁴	4.66×10 ⁻⁴	1.38×10 ⁻⁴
	60~80	8.62×10 ⁻¹	8.57×10 ⁻²	7.19×10 ⁻²	7.16×10 ⁻²	7.08×10 ⁻²	8.62×10 ⁻²	3.19×10 ⁻²	1.44×10 ⁻²	4.30×10 ⁻³	5.81×10 ⁻⁴	2.27×10 ⁻⁴	1.99×10 ⁻⁴
侧柏反坡台	0~20	4.75×10 ⁻¹	3.37×10 ⁻¹	1.72×10 ⁻¹	8.53×10 ⁻²	4.08×10 ⁻²	3.75×10 ⁻²	1.72×10 ⁻²	1.01×10 ⁻²	4.48×10 ⁻³	1.01×10 ⁻³	5.71×10 ⁻⁴	1.35×10 ⁻⁴
	20~40	3.96×10 ⁻¹	3.89×10 ⁻¹	1.64×10 ⁻¹	7.28×10 ⁻²	4.42×10 ⁻²	3.96×10 ⁻²	1.64×10 ⁻²	9.38×10 ⁻³	4.09×10 ⁻³	9.01×10 ⁻⁴	4.23×10 ⁻⁴	1.05×10 ⁻⁴
	40~60	4.56×10 ⁻¹	5.61×10 ⁻²	5.33×10 ⁻²	4.99×10 ⁻²	4.79×10 ⁻²	4.56×10 ⁻²	1.83×10 ⁻²	1.03×10 ⁻²	4.34×10 ⁻³	9.02×10 ⁻⁴	5.17×10 ⁻⁴	1.18×10 ⁻⁴
	60~80	6.60×10 ⁻¹	6.25×10 ⁻²	6.43×10 ⁻²	6.04×10 ⁻²	4.60×10 ⁻²	3.60×10 ⁻²	1.03×10 ⁻²	5.66×10 ⁻³	2.50×10 ⁻³	6.84×10 ⁻⁴	3.74×10 ⁻⁴	1.02×10 ⁻⁴
自然坡面对照	0~20	4.17×10 ⁻¹	2.91×10 ⁻¹	1.24×10 ⁻¹	7.81×10 ⁻²	5.24×10 ⁻²	4.17×10 ⁻²	1.24×10 ⁻²	6.81×10 ⁻³	2.99×10 ⁻³	1.34×10 ⁻³	6.35×10 ⁻⁴	2.16×10 ⁻⁴
	20~40	2.59×10 ⁻¹	7.22×10 ⁻²	6.99×10 ⁻²	5.89×10 ⁻²	4.80×10 ⁻²	4.15×10 ⁻²	2.00×10 ⁻²	9.02×10 ⁻³	3.12×10 ⁻³	4.08×10 ⁻⁴	5.17×10 ⁻⁴	3.45×10 ⁻⁴
	40~60	5.39×10 ⁻¹	5.20×10 ⁻²	4.61×10 ⁻²	4.58×10 ⁻²	3.22×10 ⁻²	2.39×10 ⁻²	1.91×10 ⁻²	1.05×10 ⁻²	4.38×10 ⁻³	1.04×10 ⁻³	5.29×10 ⁻⁴	1.23×10 ⁻⁴
	60~80	6.08×10 ⁻¹	6.77×10 ⁻²	5.72×10 ⁻²	5.53×10 ⁻²	5.16×10 ⁻²	4.12×10 ⁻²	1.22×10 ⁻²	6.71×10 ⁻³	2.94×10 ⁻³	7.81×10 ⁻⁴	4.21×10 ⁻⁴	1.11×10 ⁻⁴

坡面上挖掘鱼鳞半月状的坑,而反坡台是对坡面进行阶梯状的大面积的平整^[25,26],这样的修建特点导致在降雨后有坑状结构的鱼鳞坑更能集中地收集雨水在其坑中,使鱼鳞坑便于降雨后的水分收集^[26];而在干旱条件下,反坡台平整了大面积的土地使得坡面土壤蒸发面积大幅减少,而鱼鳞坑对土壤扰动小,施工量小,没有大量减少坡面土壤的蒸发面积^[27],所以土壤水分散失较大,在土壤水分保持能力方面不如反坡台。综上所述,反坡台的水土保持作用优于鱼鳞坑,而鱼鳞坑在降雨较多时也具有较好的雨水收集能力。

3.2 整地后土壤水分特性的变化

土质是影响土壤水力学性质的主要因素。水分特征曲线、持水能力、比水容量主要受土壤质地和土壤结构影响^[28]。因为该地区以黄土为成土母质,土壤孔隙较大,粒间孔隙粗,毛管力微弱,施加较小的吸力,大孔隙中的水分就被排出;而保持在小孔隙中的水分只有在较大吸力下才能被排出,这也是该地区土壤持水量低的内在原因^[28]。本研究对比整地前后的土壤水分特征曲线存在差异(图4),原本该研究区土壤黏粒含量较低,主要以较粗的砂粒、粉粒为主^[29],由于整地后改善了土壤结构和土壤环境,使在低水吸力条件下有效水比较容易供给,而在高水吸力条件下,土壤本身的结构特点决定了其供水的困难性(表4),导致供水差异逐渐变小^[30,31]。在人工整地之后,由于不同层次的土壤掺和,改善了土壤结构,同时整地后植被的生长进一步会影响土壤的持水能力。

黄土高原地区的土壤多为黄土土质,土壤发育缓慢,很难形成好的土壤结构和颗粒组成,导致其持水能力和保水能力较差,供水能力也因此较差^[31]。通过人工植被恢复和人工整地,对土壤性质和土壤环境有积极的改善作用,优化土壤环境、改善土壤质地,所以相比自然坡面,整地之后的土壤持水能力、土壤供水能力都有一定的提高(图5和表4)。在研究区的小流域,由于长时间坚持整地和植被恢复,使该地区的土壤粉粒含量逐渐提高,从而改善了土壤水分特性和理化性质。

3.3 不同整地方式下水分特性的层次性

最后,本研究中无论是土壤水分还是土壤持水、供水能力的对比,都发现整地方式对土壤表层的作用大于底层,即整地的保水效果在表层差异最明显,随着土壤深度的增加,保水效果逐渐减少,如土壤水分的对比中,两种整地方式的土壤水分在表层(0 ~

5 cm)相差 2.16% 且差异显著($P < 0.05$);而水分差异随土层加深逐渐变为不显著,在 80 ~ 100 cm 土层两者相差 0.94%,差异不显著($P > 0.05$)。相似地,整地后土壤的保水能力、供水能力也显示表层效益更好(图5和表4)。由于整地改变土壤下垫面结构从而改变了水文路径,这就导致泥沙(土壤颗粒)的运移和传输发生了改变^[32],在降雨的驱动下,整地导致了不同土壤颗粒的运移程度的差异,所以合理地整地后形成了良好的土壤结构,土壤具有更好的保水性质,从而使得整地的土壤有较好的水力学性质^[33]。综上所述,整地时主要改造土壤表层的结构,所以对土壤表层影响较大,并且相关研究也表明深层土壤性质更多受植物根系和土壤性质等影响^[34~36]。

4 结论

(1)黄土高原龙滩流域地区,整地可以有效地提高土壤水分含量。基于两年土壤水分数据对比,整地方式和自然坡面的平均土壤水分含量由高到低分别是反坡台 > 鱼鳞坑 > 自然坡面。相比自然坡面,反坡台和鱼鳞坑整地后土壤水分含量分别提高了 29.69% 和 15.55%。整地后土壤水分平均提高 1.883%,相比自然坡面高出了 22.62%。

(2)在植被覆盖程度相似的情况下,长期的整地工程措施对土壤性质有明显的改善。根据对比土壤持水性质和土壤的供水能力,比较田间持水量、有效含水量和比水容量,整地后土壤的持水能力有了明显的提高,相比自然坡面,鱼鳞坑和反坡台饱和含水量分别提高了 7.52% 和 4.24%,有效水含量分别提高了 4.74% 和 11.40%。

(3)对比不同土壤深度的水分情况,整地后表层水分常数显著高于底层。与对照相比,鱼鳞坑和反坡台表层土壤(0 ~ 20 cm)有效水分提高了 38.75% 和 23.84%,而深层(60 ~ 80 cm)有效水分与自然坡面差异只有 3.34% 和 3.85%,说明整地对土壤表层的水分特性提高效益优于底层土。

参考文献:

- [1] 傅伯杰, 马克明, 周华峰, 等. 黄土丘陵区土地利用结构对土壤养分分布的影响[J]. 科学通报, 1998, 43(22): 2444-2448.
Fu B J, Ma K M, Zhou H F, et al. The effect of land use structure on the distribution of soil nutrients in the hilly area of the Loess Plateau, China[J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(8): 732-736.
- [2] 李保国, 任图生, 张佳宝. 土壤物理学研究的现状、挑战与任务[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 810-816.

- Li B G, Ren T S, Zhang J B. Current status, challenges, and missions in soil physics[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, **45** (5): 810-816.
- [3] 何永涛, 李文华, 李贵才, 等. 黄土高原地区森林植被生态需水研究[J]. *环境科学*, 2004, **25**(3): 35-39.
- He Y T, Li W H, Li G C, *et al.* Ecological water requirement of forests in Loess Plateau[J]. *Environmental Science*, 2004, **25** (3): 35-39.
- [4] 卫伟, 余韵, 贾福岩, 等. 微地形改造的生态环境效应研究进展[J]. *生态学报*, 2013, **33**(20): 6462-6469.
- Wei W, Yu Y, Jia F Y, *et al.* Research progress in the ecological effects of micro-landform modification [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(20): 6462-6469.
- [5] 刘恩斌, 董水丽. 黄土高原主要土壤持水性能及抗旱性的评价[J]. *水土保持通报*, 1997, **17**(7): 21-27.
- Liu E B, Dong S L. Evaluation on water capacity and antidrought of main soils in Loess Plateau[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1997, **17**(7): 21-27.
- [6] 宁婷, 郭忠升, 李耀林. 黄土丘陵区撂荒地土壤水分特征曲线及水分常数的垂直变异[J]. *水土保持学报*, 2014, **28** (3): 166-170.
- Ning T, Guo Z S, Li Y L. Soil water characteristic curves and soil water constants at different depths in the abandoned sloping field of Loess Hilly Region [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, **28**(3): 166-170.
- [7] Kargas G, Londra P A. Effect of tillage practices on the hydraulic properties of a loamy soil[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2015, **54**(8): 2138-2146.
- [8] Peck A J, Luxmoore R J, Stolzy J L. Effects of spatial variability of soil hydraulic properties in water budget modeling[J]. *Water Resources Research*, 1977, **13**(2): 348-354.
- [9] Lin L R, Chen J Z. The effect of conservation practices in sloped croplands on soil hydraulic properties and root-zone moisture dynamics [J]. *Hydrological Processes*, 2015, **29**(9): 2079-2088.
- [10] 白一茹, 邵明安. 黄土高原水蚀风蚀交错带不同土地利用方式坡面土壤水分特性研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2009, **27**(1): 122-129.
- Bai Y R, Shao M A. Soil water properties in a slope of different land use in the wind-water erosion crisscross region on the Loess Plateau[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, **27** (1): 122-129.
- [11] Ren Z P, Zhu L J, Wang B, *et al.* Soil hydraulic conductivity as affected by vegetation restoration age on the Loess Plateau, China [J]. *Journal of Arid Land*, 2016, **8**(4): 546-555.
- [12] 王文焰, 王全九, 张建丰, 等. 甘肃秦王川地区土壤水分运动参数及相关性[J]. *水土保持学报*, 2002, **16**(3): 110-113.
- Wang W Y, Wang Q J, Zhang J F, *et al.* Soil hydraulic properties and correlation in Qingwangchuan Area of Gansu Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, **16** (3): 110-113.
- [13] 徐良富, 李洪建, 刘太维. 晋西北砖窑沟流域几种主要土壤的持水特性[J]. *土壤通报*, 1994, **25**(5): 199-200.
- [14] Yang X, You X Y. Estimating parameters of Van Genuchten model for soil water retention curve by intelligent algorithms[J]. *Applied Mathematics & Information Sciences*, 2013, **7**(5): 1977-1983.
- [15] 于洋, 卫伟, 陈利顶, 等. 黄土丘陵区坡面整地和植被耦合下的土壤水分特征[J]. *生态学报*, 2016, **36**(11): 3441-3449.
- Yu Y, Wei W, Chen L D, *et al.* Coupling effects of different land preparation and vegetation on soil moisture characteristics in a semi-arid Loess Hilly region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(11): 3441-3449.
- [16] 杨磊, 卫伟, 莫保儒, 等. 半干旱黄土丘陵区不同人工植被恢复土壤水分的相对亏缺[J]. *生态学报*, 2011, **31**(11): 3060-3068.
- Yang L, Wei W, Mo B R, *et al.* Soilwater deficit under different artificial vegetation restoration in the semi-arid hilly region of the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(11): 3060-3068.
- [17] 吕贻忠, 李保国. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006. 53.
- [18] Van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, **44**(5): 892-898.
- [19] Prasad R, Singh V. Note on methods of land preparation and weed control in directly sown and transplanted rice[J]. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 1975, **45**: 377-379.
- [20] Wei W, Chen L D, Wang L X, *et al.* Global synthesis of the classifications, distributions, benefits and issues of terracing[J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, **159**: 388-403.
- [21] Xue Z, Akai T. Maximum surface temperature model to evaluate evaporation from a saline soil in arid area[J]. *Paddy and Water Environment*, 2012, **10**(2): 153-159.
- [22] 吴煜禾, 张洪江, 王伟, 等. 重庆四面山不同土地利用方式土壤水分特征曲线测定与评价[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2011, **33**(5): 102-108.
- Wu Y H, Zhang H J, Wang W, *et al.* Determination of soil water characteristic curve with different models and their evaluation under different land uses in the Simian Mountains, Chongqing[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2011, **33**(5): 102-108.
- [23] 李小刚, 杨治, 谢恩波. 甘肃几种旱地土壤低吸力段持水性能的初步研究[J]. *土壤通报*, 1994, **25**(4): 155-157.
- [24] 尤全刚, 薛炯, 彭飞, 等. 高寒草甸草地退化对土壤水热性质的影响及其环境效应[J]. *中国沙漠*, 2015, **35**(5): 1183-1192.
- You Q G, Xue X, Peng F, *et al.* Alpine meadow degradation effect on soil thermal and hydraulic properties and its environmental impacts [J]. *Journal of Desert Research*, 2015, **35**(5): 1183-1192.
- [25] 朱聿申, 陈宇轩, 查同刚, 等. 大鱼鳞坑双苗造林技术在黄土沟壑区的应用效果[J]. *干旱区研究*, 2016, **33**(3): 560-568.
- Zhu Y S, Chen Y X, Zha T G, *et al.* Application of double-seedling afforestation technique in big fish-scale pits in the Loess Gully Area[J]. *Arid Zone Research*, 2016, **33**(3): 560-568.
- [26] 符素华, 刘宝元, 路丙辉, 等. 官厅水库上游水土保持措施的减水减沙效益[J]. *中国水土保持科学*, 2009, **7**(2): 18-23.
- Fu S H, Liu B Y, Lu B H, *et al.* Effect of soil conservation practice on runoff and sediment in upper reach of Guanting

- Reservoir[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009, 7 (2): 18-23.
- [27] 张北赢, 徐学选, 刘文兆. 黄土丘陵沟壑区不同水保措施条件下土壤水分状况[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 54-58.
- Zhang B Y, Xu X X, Liu W Z. Soil water condition under different measures of soil and water conservation in Loess Hilly and Gully Region[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(4): 54-58.
- [28] 张华兵, 刘红玉, 李玉凤, 等. 自然条件下盐城海滨湿地土壤水分/盐度空间分异及其与植被关系研究[J]. 环境科学, 2013, 34(2): 540-546.
- Zhang H B, Liu H Y, Li Y F, *et al.* Spatial variation of soil moisture/salinity and the relationship with vegetation under natural conditions in Yancheng coastal wetland [J]. Environmental Science, 2013, 34(2): 540-546.
- [29] 陈志雄, 汪仁真. 中国几种主要土壤的持水性[J]. 土壤学报, 1979, 16(3): 277-281.
- Chen Z X, Wang R Z. The moisture retention of several important soils in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 1979, 16(3): 277-281.
- [30] Umarova A B, Shein E V, Kukharuk N S. Soil water retention curve of agrogray soils: influence of anisotropy and the scaling factor [J]. Eurasian Soil Science, 2014, 47 (12): 1238-1244.
- [31] Dastjerdi M H T, Habibagahi G, Nikoee E. Effect of confining stress on soil water retention curve and its impact on the shear strength of unsaturated soils[J]. Vadose Zone Journal, 2014, 13 (5): 1-11.
- [32] 张延, 梁爱珍, 张晓平, 等. 不同耕作方式下土壤水分状况对土壤呼吸的初期影响[J]. 环境科学, 2016, 37(3): 1106-1113.
- Zhang Y, Liang A Z, Zhang X P, *et al.* Priming effects of soil moisture on soil respiration under different tillage practices[J]. Environmental Science, 2016, 37(3): 1106-1113.
- [33] 王云强, 张兴昌, 韩凤朋. 黄土高原淤地坝土壤性质剖面变化规律及其功能探讨[J]. 环境科学, 2008, 29(4): 1020-1026.
- Wang Y Q, Zhang X C, Han F P. Profile variability of soil properties in check dam on the Loess Plateau and its functions [J]. Environmental Science, 2008, 29(4): 1020-1026.
- [34] Appels W M, Bogaart P M, van der Zee S E A T M, *et al.* Influence of spatial variations of microtopography and infiltration on surface runoff and field scale hydrological connectivity [J]. Advances in Water Resources, 2011, 34(2): 303-313.
- [35] de Melo Filho J F, do Sacramento J A A S, Conceição B P S. Water-retention curve modelled by the psychrometer method for soil physical quality index determination [J]. Engenharia Agrícola, 2015, 35(5): 959-966.
- [36] 蔡立群, 罗珠珠, 张仁陟, 等. 不同耕作措施对旱地农田土壤水分保持及入渗性能的影响研究[J]. 中国沙漠, 2012, 32(5): 1362-1368.
- Cai L Q, Luo Z Z, Zhang R Z, *et al.* Effect of different tillage methods on soil water retention and infiltration capability of rainfed field [J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(5): 1362-1368.

CONTENTS

Emission Characteristics of Vehicles from National Roads and Provincial Roads in China	WANG Ren-jie, WANG Kun, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (3553)
Impact of Gustly Northwesterly Winds on Biological Particles in Winter in Beijing	YAN Wei-zhuo, WANG Bu-ying, Oscar Fajardo Montana, <i>et al.</i> (3561)
Characteristics of Particulate Matter and Carbonaceous Species in Ambient Air at Different Air Quality Levels	FANG Xiao-zhen, WU Lin, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3569)
Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Particulate Matter and Dust	WANG Yong-xiao, CAO Hong-ying, DENG Ya-jia, <i>et al.</i> (3575)
Observational Study of Air Pollution Complex in Nanjing in June 2014	HAO Jian-qi, GE Bao-zhu, WANG Zi-fa, <i>et al.</i> (3585)
Distribution Characteristics of Air Pollutants and Aerosol Chemical Components Under Different Weather Conditions in Jiaxing	WANG Hong-lei, SHEN Li-juan, TANG Qian, <i>et al.</i> (3594)
Observations of Reactive Nitrogen and Sulfur Compounds During Haze Episodes Using a Demuder-based System	TIAN Shi-li, LIU Xue-jun, PAN Yue-peng, <i>et al.</i> (3605)
Analysis of Anthropogenic Reactive Nitrogen Emissions and Its Features on a Prefecture-level City in Fujian Province	ZHANG Qian-hu, GAO Bing, HUANG Wei, <i>et al.</i> (3610)
Levels, Sources, and Health Risk Assessments of Heavy Metals in Indoor Dust in a College in the Pearl River Delta	CAI Yun-mei, HUANG Han-shu, REN Lu-lu, <i>et al.</i> (3620)
Influence of Noble Metal and Promoter Capacity in CDPF on Particulate Matter Emissions of Diesel Bus	TAN Pi-qiang, ZHONG Yi-mei, ZHENG Yuan-fei, <i>et al.</i> (3628)
Spatial Distribution, Source and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Coastal Sediments of Northern Dongying City	LIU Qun-qun, MENG Fan-ping, WANG Fei-fei, <i>et al.</i> (3635)
Remote Sensing of Chlorophyll-a Concentrations in Lake Hongze Using Long Time Series MERIS Observations	LIU Ge, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (3645)
Analysis of Spatial Variability of Water Quality and Pollution Sources in Lihe River Watershed, Taihu Lake Basin	LIAN Hui-shu, LIU Hong-bin, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (3657)
Distribution of Different Phosphorus Species in Water and Sediments from Gaocun to Lijin Reaches of the Yellow River	ZHAO Tun, JIA Yan-xiang, JIANG Bing-qi, <i>et al.</i> (3666)
Characterization of Phosphorus Fractions in the Soil of Water-Level-Fluctuation Zone and Unflooded Banksides in Pengxi River, Three Gorges Reservoir	 HUANG Jun-jie, WANG Chao, FANG Bo, <i>et al.</i> (3673)
Distribution of <i>n</i> -alkanes from Lake Wanghu Sediments in Relation to Environmental Changes	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, ZENG Hai-ao, <i>et al.</i> (3682)
Hydrological Performance Assessment of Permeable Parking Lots in High Water Areas	JIN Jian-rong, LI Tian, WANG Sheng-si, <i>et al.</i> (3689)
Analysis of the Characteristics of Groundwater Quality in a Typical Vegetable Field, Northern China	YU Jing, YU Min-da, LAN Yan, <i>et al.</i> (3696)
Composition, Evolution, and Complexation of Dissolved Organic Matter with Heavy Metals in Landfills	XIAO Xiao, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (3705)
Correlations Between Substrate Structure and Microbial Community in Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Zhen-ling, DING Yan-li, BAI Shao-yuan, <i>et al.</i> (3713)
Impact of Talc Ore Mining on Periphyton Community Structure and Water Environment	ZANG Xiao-miao, ZHANG Yuan, LIN Jia-ning, <i>et al.</i> (3721)
Physiological Characteristics and Nitrogen and Phosphorus Uptake of <i>Myriophyllum aquaticum</i> Under High Ammonium Conditions	LIU Shao-bo, RAN Bin, ZENG Guan-jun, <i>et al.</i> (3731)
Removal of Algal Organic Matter and Control of Disinfection By-products by Powder Activated Carbon	MIAO Yu, ZHAI Hong-yan, YU Shan-shan, <i>et al.</i> (3738)
Preparation and Pb ²⁺ Electrosorption Characteristics of Graphene Hydrogels Electrode	WANG Yao, JI Qing-hua, LI Yong-feng, <i>et al.</i> (3747)
Influence of Current Densities on Mineralization of Indole by BDD Electrode	ZHANG Jia-wei, WANG Ting, ZHENG Tong, <i>et al.</i> (3755)
Mechanism of Photochemical Degradation of MC-LR by Pyrite	ZHOU Wei, FANG Yan-fen, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (3762)
Enhanced Treatment of Printing and Dyeing Wastewater Using H ₂ O ₂ -Biochemical Method	YUE Xiu, TANG Jia-li, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (3769)
Effects of Influent C/N Ratios on Denitrifying Phosphorus Removal Performance Based on ABR-MBR Combined Process	WU Peng, CHENG Chao-yang, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (3781)
Start-up of a High Performance Nitrosation Reactor Through Continuous Growth of Aerobic Granular Sludge	GAO Jun-jun, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3787)
Activated Sludge Mineralization and Solutions in the Process of Zero-Valent Iron Autotrophic Denitrification	ZHANG Ning-bo, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3793)
Analysis of Respirogram Characteristics of Filamentous Bulking Caused by Low Dissolved Oxygen	MA Zhi-bo, LI Zhi-hua, YANG Cheng-jian, <i>et al.</i> (3801)
Aerobic Degradation and Microbial Community Succession of Coking Wastewater with Municipal Sludge	LIU Guo-xin, WU Hai-zhen, SUN Sheng-li, <i>et al.</i> (3807)
Rapid Culture, Microbial Community Structure, and Diversity of High-Efficiency Denitrifying Bacteria	MENG Ting, YANG Hong, <i>et al.</i> (3816)
Abundance of Cell-associated and Cell-free Antibiotic Resistance Genes in Two Wastewater Treatment Systems	ZHANG Yan, CHEN Lü-jun, XIE Hui, <i>et al.</i> (3823)
Effect of Biochar on CH ₄ and N ₂ O Emissions from Lou Soil	ZHOU Feng, XU Chen-yang, WANG Yue-ling, <i>et al.</i> (3831)
Spatial Variability of C-to-N Ratio of Farmland Soil in Jiangxi Province	JIANG Ye-feng, GUO Xi, SUN Kai, <i>et al.</i> (3840)
Influence of Calcium Carbonate and Biochar Addition on Soil Nitrogen Retention in Acidified Vegetable Soil	YU Ying-liang, YANG Lin-zhang, Alfred Oduor Odindo, <i>et al.</i> (3845)
Comparison of Soil Hydraulic Characteristics Under the Conditions of Long-term Land Preparation and Natural Slope in Longtan Catchment of the Loess Hilly Region	 FENG Tian-jiao, WEI Wei, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (3860)
Effects of Organic Carbon Content on the Residue and Migration of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil Profiles	 FEI Jia-jia, ZHANG Zhi-huan, WAN Tian-tian, <i>et al.</i> (3871)
Major Factors Influencing the Cd Content and Seasonal Dynamics in Different Land Cover Soils in a Typical Acid Rain Region	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (3882)
Application Potential and Assessment of Metallurgical Contaminated Soil After Remediation in Tongguan of Shaanxi	WANG Jiao, XIAO Ran, LI Rong-hua, <i>et al.</i> (3888)
Effects and Mechanisms of In-situ Cement Solidification/Stabilization on a Pb-, Zn-, and Cd-Contaminated Site at Baiyin, China	LÜ Hao-yang, FEI Yang, WANG Ai-qin, <i>et al.</i> (3897)
Concentrations and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Soils and Vegetables Influenced by Facility Cultivation	 JIN Xiao-pei, JIA Jin-pu, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (3907)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Uptake of La and Pb by Maize Grown in La and Pb-Contaminated Soil	CHANG Qing, GUO Wei, PAN Liang, <i>et al.</i> (3915)
Effects of Straw Incorporation on Cadmium Accumulation and Subcellular Distribution in Rice	DUAN Gui-lan, WANG Fang, CEN Kuang, <i>et al.</i> (3927)
Redox Transformation of Arsenic and Antimony in Soils Mediated by <i>Pantoea</i> sp. IMH	 ZHANG Lin, LU Jin-suo (3937)
Adsorption Characteristics of Biochar on Heavy Metals (Pb and Zn) in Soil	WANG Hong, XIA Wen, LU Ping, <i>et al.</i> (3944)
Characteristics of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochars and Their Adsorption Performance and Mechanisms for Cr(VI)	CHEN You-yuan, HUI Hong-xia, LU Shuang, <i>et al.</i> (3953)
External Phosphorus Adsorption and Immobility with the Addition of Ignited Water Purification Sludge	YU Sheng-nan, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (3962)
Preparation of Adsorption Ceramsite Derived from Sludge Biochar	LI Jie, PAN Lan-jia, YU Guang-wei, <i>et al.</i> (3970)
Construction of Graphitic Carbon Nitride-Bismuth Oxyiodide Layered Heterostructures and Their Photocatalytic Antibacterial Performance	 HUANG Jian-hui, LIN Wen-ting, XIE Li-yan, <i>et al.</i> (3979)