

纳米 TiO_2 对土壤水分运动及离子 迁移过程影响的试验研究

吕金榜, 周蓓蓓, 王全九, 胡梓超, 潘二恒

(西安理工大学 水利水电学院 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 西安 710048)

摘要: 为了研究纳米 TiO_2 对土壤水分养分运动及重金属吸附过程的影响, 基于室内一维垂直定水头土柱试验, 采用扰动黄绵土均匀添加不同含量纳米 TiO_2 作为研究对象(质量含量分别为 0, 0.001, 0.005, 0.01, 0.05 g/g), 分别测定土壤累积入渗量曲线、水分特征曲线、溶质穿透曲线及重金属等温吸附曲线。结果表明: (1) 纳米 TiO_2 对土壤水分入渗过程产生阻碍作用, 入渗率随着纳米 TiO_2 含量增加而减小; (2) 纳米 TiO_2 可以提高土壤的持水能力, 随着纳米 TiO_2 含量增加, 相同土壤水吸力下的土壤含水量增大, 进气吸力(α)随纳米 TiO_2 含量增加而增大, 形状参数(n)随之减小; (3) 纳米 TiO_2 可以有效提高土壤吸附惰性离子能力, 随纳米 TiO_2 含量增加, 初始穿透时间提前, 完全穿透时间延长, 弥散度增大。 (4) 相同平衡浓度, 随着纳米 TiO_2 含量的增加, Cu^{2+} 吸附量加大。采用 Langmuir 方程拟合 Cu^{2+} 等温吸附曲线, 最大吸附量(S_m)随着纳米 TiO_2 含量增加而增大。研究可为改善黄绵土保水保肥性及重金属污染的治理提供理论依据。

关键词: 纳米 TiO_2 ; 土壤入渗; 水分特征曲线; 溶质穿透曲线; 等温吸附曲线

中图分类号: S152

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)05-0058-04

Experimental Study on Effects of Nano TiO_2 on Water Movement, Solute Transport in Soil Columns

LÜ Jinbang, ZHOU Beibei, WANG Quanjiu, HU Zichao, PAN Erheng

(College of Water Conservancy and Hydropower, State Key Laboratory Base of Eco-Hydraulic
Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Based on disturbed one-dimensional loessial soil columns, we studied the effects of different nano TiO_2 contents (0 g/g, 0.001 g/g, 0.005 g/g, 0.01 g/g and 0.05 g/g) on water movement, solute transport as well as metal adsorption. Cumulative infiltration, the moisture characteristic curves, solute breakthrough curves and isothermal adsorption curve of heavy metals were measured separately during the experimental process. The main results were showed as follows. (1) The nano TiO_2 inhibited the process of soil water infiltration and the infiltration rate decreased with the increase of nano TiO_2 contents. (2) Nano TiO_2 can improve the water-holding capacity of soil, while under the same soil water suction, soil water contents and the inlet suction (α) increased with the increase of nano TiO_2 contents, but the shape parameter (n) decreased. (3) Nano TiO_2 improved soil solute holding ability effectively; with the increase of nano TiO_2 contents, initial penetration time advanced and the dispersivity increased, but the breakthrough time prolonged. (4) With respect to the same equilibrium concentration, the Cu^{2+} adsorption quantity increased with the increase of nano TiO_2 contents. Cu^{2+} isothermal adsorption curves could be described by the Langmuir equation, and it was found that the maximum adsorption (S_m) increased with the increase of TiO_2 contents. These results could provide the theoretical basis for the improvement of soil water and nutrient capacity as well as heavy metal pollution control.

Keywords: nano titanium; water infiltration; moisture characteristic curve; solute breakthrough curve; isothermal adsorption curve

收稿日期: 2015-03-27

修回日期: 2015-04-08

资助项目: 国家自然科学基金重点项目(51239009); 国家自然科学基金面上项目(41371239); 陕西省科技支撑项目(2013KJXX-38); 陕西省水利专项支撑计划(2012slkj-04; 2013slkj-04); 陕西省自然科学基金(2015JQ5161)

第一作者: 吕金榜(1991—), 男, 河南新乡人, 在读研究生, 主要研究方向: 农业水土资源与生态环境。E-mail: 513453706@qq.com

通信作者: 周蓓蓓(1982—), 女, 陕西西安人, 博士, 副教授, 主要研究方向: 农业水土与生态环境。E-mail: happyangle222@gmail.com

将尺寸范围介于 $10^{-7} \sim 10^{-9}$ m 的纳米材料应用于土壤物理学领域是该领域的一个新的突破,其主要原理为利用纳米材料小尺寸效应、表面界面效应、量子尺寸效应和量子隧道效应等基本特性,期待获得许多传统材料不具备的特性^[1],相对于其它的金属氧化物, TiO₂ 中 Ti-O 键的极性较大,表面吸附的水因极化发生解离,容易形成羟基。这种表面羟基可提高 TiO₂ 作为吸附剂及各种载体的性能,为表面改性提供方便^[2],另外,由于其尺寸的细微化,表现出悬浮液稳定,有较强的吸附能力等独特的物理特性^[3],因此在土壤物理学领域的应用上显示出较大潜力,并可将其应用于农业土壤环境领域^[4]。周建敏等^[5]将纳米 TiO₂ 作为光催化剂,对城市生活废水进行降解试验研究,考察了常温下催化剂的用量、光照时间及 pH 值等因素对城市生活废水处理效果的影响,研究得出在筛选出的最佳光催化处理工艺条件下, COD 的降解率达到 91.3%, NH₃-N 的降解率达到 72.4%。肖亚兵等^[6]研究了纳米 TiO₂ 对砷(Ⅲ)和砷(Ⅴ)的吸附行为,结果表明纳米 TiO₂ 在 pH 为 1~10 范围内对 As(Ⅲ)和 As(Ⅴ)的吸附率可达 99%。Zheng 等^[7]对 TiO₂ 进行了研究得出,施用纳米 TiO₂ 能促进菠菜种子发芽,增加植株干重,促进叶绿素形成及提高光合速率。刘健等^[8-9]研究表明,将纳米碳添加到普通尿素中,能促进早稻、玉米、花生、大豆、小麦等作物的生长,增加作物的产量。目前国内外众多研究表明,纳米 TiO₂ 材料对土壤重金属污染及作物生长具有明显的改善作用,但纳米 TiO₂ 对土壤水分养分运动及重金属吸附内在机理方面的研究相对较少。

黄绵土是陕北地区典型土壤类型之一,由于其土层深厚,土质疏松,水分养分流失严重,陕北地区生态系统经常面临被破坏的威胁,而且耕地土壤重金属污染严重^[10],黄土区农业生产效率及生态环境的健康发展受到极大威胁。基于纳米 TiO₂ 材料具有高比表面积、小尺寸效应及高吸附性等特殊性质,将其应用于土壤水分养分流失及重金属吸附过程的研究,通过调节土壤颗粒间结构,改变其理化性质,提高土壤持水保肥性,可为改善黄绵土水肥流失及土壤重金属污染治理状况提供新的理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土样

土样采自陕西省安塞县试验站空闲农地,供试土样黏粒含量为 5.53%,粉粒含量为 19.32%,砂粒含量为 75.15%,供试土样为砂质壤土。将待测土样压碎,过 2 mm 筛后烘干备用,纳米 TiO₂ 与备用黄绵土

分别按照纳米 TiO₂ 质量含量为 0, 0.001, 0.005, 0.01, 0.05 g/g 均匀混合,装土容重为 1.35 g/cm³。其中, 0 g/g 为不含纳米 TiO₂ 的对照处理,试验共设 5 组处理,每组处理 3 次重复。

1.2 试验方法

本试验采用定水头垂直入渗测定不同纳米 TiO₂ 含量下的黄绵土入渗过程。试验土柱采用壁厚 0.5 cm, 内径 5 cm, 高 35 cm 有机玻璃柱。将试验土样分四层(每层 5 cm)均匀装入有机玻璃柱内,填装好土柱后,在土壤顶部放一层滤纸,防止通入蒸馏水时直接冲刷土柱,破坏土柱上表面。采用马氏瓶定水头供水,马氏瓶为内径 5 cm, 高 35 cm 的有机玻璃柱,供水水头控制在 7.2 cm。试验过程中,观测马氏瓶中的水面高度变化和湿润锋的垂直深度随时间的变化,直至湿润锋达到土柱底部为止。

入渗试验结束后,继续通蒸馏水直至土样饱和,然后立即吸去土柱表层水分,通入 0.15 mol/L 的 CaCl₂ 溶液进行置换试验,水头仍保持在 7.2 cm,并在土柱下端用量筒承接出流液(每 10 ml 接取一次),直至出流液中 Cl⁻ 浓度等于置换液中 Cl⁻ 浓度。采用 0.01 mol/L 的 AgNO₃ 溶液滴定获得出流液中 Cl⁻ 浓度,其中以 10% 质量浓度的重铬酸钾为指示剂。

采用离心机法测定土壤水分特征曲线。同样按设定容重 1.35 g/cm³ 称取一定量不同处理土样装入环刀中,并浸入蒸馏水中使其自下向上充分饱和,称重后依次放入离心机,测定不同吸力下对应的土壤含水量。

测定 Cu²⁺ 等温吸附曲线,在 40 ml 具塞离心管中加入 1.00 g 不同处理的土样,然后分别加入浓度为 2, 4, 8, 12, 16, 20 mmol/L 的 Cu(NO₃)₂ 溶液 10 ml。加塞密封,在恒温下震荡 2 h,静置平衡 24 h,以 10 000 rpm 的转速离心分离 30 min,收集上清液,用原子吸收分光光度计测定上清液中 Cu²⁺ 的浓度。

2 结果与分析

2.1 纳米 TiO₂ 对累积入渗量的影响

将不同处理土样的时间—累积入渗量曲线绘于图 1。可以看出,入渗率随着纳米 TiO₂ 含量增加呈减小的趋势,在入渗初期,纳米 TiO₂ 对土壤入渗率影响较小,曲线差异较小,入渗时间增长,随纳米 TiO₂ 含量增加,相同入渗历时,累积入渗量呈明显的减小趋势。当纳米 TiO₂ 含量为 5% 时,对土壤累积入渗量影响极为显著,即使在入渗初期,一定入渗历时内,累积入渗量亦显著低于对照试验。这主要是由于纳米 TiO₂ 的存在,使得黄绵土中的大孔隙被极其

细小的纳米 TiO₂ 颗粒填充为多个小孔隙,大孔隙数量降低,小孔隙数量增加,同时由于纳米 TiO₂ 的存在,改变了原本的水流通道,孔隙弯曲度增加,从而抑制水分入渗。因此,纳米 TiO₂ 对提高土壤有效水分含量,提高土壤持水性具有重要意义。

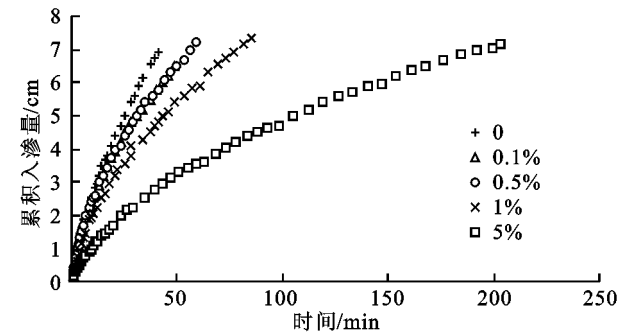


图 1 不同纳米 TiO₂ 含量对累积入渗量随时间变化的影响

为进一步分析纳米 TiO₂ 对黄绵土入渗过程的影响,利用 Philip 方程对累积入渗量随时间变化过程进行拟合。拟合结果见表 1,决定系数 R^2 较高,均达到显著性水平 ($p < 0.01$)。说明 Philip 方程能较好描述不同纳米 TiO₂ 含量的黄绵土累积入渗量变化过程。Philip 方程中,吸渗率 S 反映土壤入渗能力, A 为近似饱和导水率,其中稳渗率 A 、吸渗率 S 均呈减小趋势,即土壤入渗能力降低。表明纳米 TiO₂ 可以有效改善土壤结构,降低土壤入渗能力,增加水分在土壤中滞留时间,提高水分有效性具有重要意义。

表 1 不同纳米 TiO₂ 含量条件下累积入渗量随时间变化过程的拟合结果

纳米 TiO ₂ 含量/ (g · g ⁻¹)	A/ (cm · min ⁻¹)	S/ (cm · min ^{-1/2})	R ²
0	0.086	0.626	0.999
0.001	0.048	0.614	0.996
0.005	0.041	0.581	0.995
0.01	0.028	0.555	0.995
0.05	0.011	0.358	0.996

2.2 纳米 TiO₂ 对土壤水分特征曲线的影响

为进一步研究纳米 TiO₂ 含量对土壤水分入渗过程的影响,本文测定了不同纳米 TiO₂ 含量的黄绵土水分特征曲线,结果如图 2 所示。可以看出,随土壤含水量减小,水吸力起初平缓上升,而后转入急速上升阶段,初始上升点处的土壤含水量随纳米 TiO₂ 含量增加而增大,随纳米 TiO₂ 含量增加,相同土壤含水量下的水吸力增大,水分特征曲线愈加陡直,即随吸力增加,土壤含水量的减小量变小。这说明添加纳米 TiO₂ 后土壤持水能力有所提高。一方面,添加纳米 TiO₂ 后,土壤中大孔隙数量降低,小孔隙数量增加,相对于大孔隙,小孔隙中的水分受外界吸力影

响较小,不易析出。另一方面,细粒径的纳米 TiO₂ 增加了土壤的黏粒含量,改善了土壤质地^[13],而且纳米 TiO₂ 表面能极高,对水分有较高的吸持力。因此纳米 TiO₂ 对提高土壤保水性有重要意义。

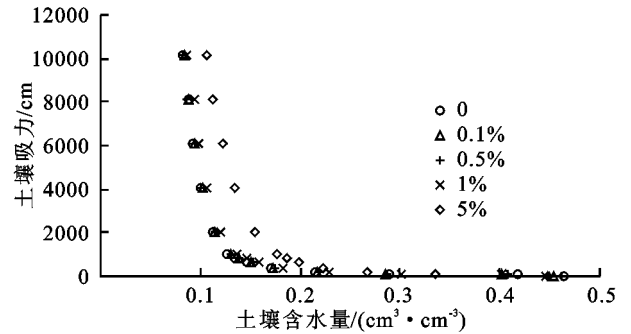


图 2 纳米 TiO₂ 含量对水分特征曲线的影响

为进一步分析纳米 TiO₂ 对土壤水分运动参数的影响,本文利用 RETC 软件中 van Genuchten 经验模型对水分特征曲线进行拟合,拟合参数值见表 2,决定系数 R^2 均在 0.99 以上,达到显著水平 ($p < 0.01$),形状参数 n, m 是表征水分特征曲线的斜率,反映着土壤的释水速率^[11], n 随纳米 TiO₂ 含量升高而减小,说明土壤释水速率降低,即吸水能力提高;参数 α 表示土壤进气吸力相关的参数, α 值随纳米 TiO₂ 含量升高而增大,表明土壤进气吸力在减小,相同条件下土壤持水性升高,土壤水势升高^[12]。

表 2 RETC 拟合参数结果

纳米 TiO ₂ 含量/(g · g ⁻¹)	α /(cm ⁻¹)	n	R^2
0	0.019	1.782	0.991
0.001	0.019	1.731	0.992
0.005	0.021	1.705	0.993
0.01	0.024	1.673	0.994
0.05	0.025	1.482	0.996

2.3 纳米 TiO₂ 对氯离子迁移过程的影响

本试验选择惰性离子 Cl⁻ 作为示踪元素,根据试验结果,将不同处理土样的溶质穿透曲线绘于图 3,本文利用 CXTFIT 2.1 中对流弥散理论反推溶质迁移方程的重要参数,迁移参数见表 3。

由图 3 可以看出,对于不同处理土样,初始穿透时出流液体积均小于一个孔隙体积。进一步分析可以看出,随纳米 TiO₂ 含量的增加,初始穿透体积数减小,完全穿透体积数增大,这是由于纳米 TiO₂ 颗粒极其细小,土壤中大孔隙被其填充,小孔隙增加,水流弯曲度增加,导致机械弥散作用增强,进而使完全穿透土柱的时间延长。进一步分析图 3 可以看出,氯离子溶液最终穿透浓度与初始浓度一致,表明纳米 TiO₂ 不会将惰性离子吸附,影响其在土壤剖面的浓度分布,因此纳米 TiO₂ 对减缓黄绵土土壤剖面中养分流失具有重要意义。

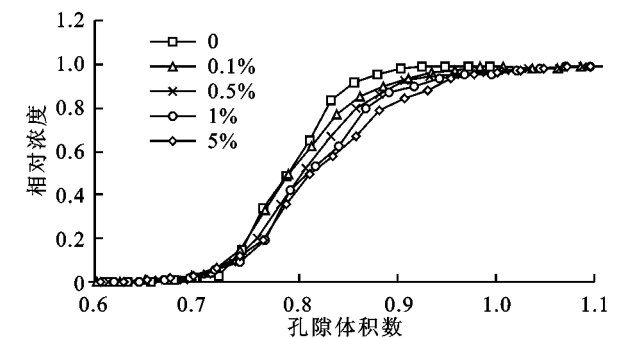


图 3 纳米 TiO₂ 含量对黄绵土溶质迁移的影响

利用 CDE 对氯离子穿透曲线进行拟合, 并将拟合结果列于表 3。由表 3 可以看出, 决定系数 R^2 均在 0.99 以上, 达到显著水平 ($p < 0.01$), SSQ 为拟合值和实测值的剩余平方和, SSQ 值远小于 1, 表明 CDE 能很好地描述各处理下的 Cl^- 溶质迁移情况。随纳米 TiO₂ 含量增加, 水动力弥散系数 (D) 及弥散度 (λ) 增大, 纳米 TiO₂ 颗粒增加了土壤中小孔隙数及水流通道曲折度, Cl^- 在土壤迁移过程中的机械弥散作用增大, 弥散度亦随之增大。因此可以进一步确定纳米 TiO₂ 可抑制土壤中溶质迁移。

表 3 溶质迁移参数					
纳米 TiO ₂ 含量/ (g · g ⁻¹)	v / (cm · h ⁻¹)	D / (cm ² · h ⁻¹)	λ / cm	SSQ	R^2
0	13.86	0.269	0.019	0.0001	0.9994
0.001	13.78	0.437	0.032	0.0002	0.9993
0.005	13.58	0.456	0.034	0.0001	0.9994
0.01	13.78	0.525	0.038	0.0003	0.9989
0.05	13.34	0.649	0.049	0.0001	0.9994

2.4 纳米 TiO₂ 含量对铜离子等温吸附曲线的影响

研究土壤对重金属的吸附特征时, 经常用到的一种方法是等温吸附曲线法, 根据测定重金属离子的等温吸附曲线的特征, 可以判断出土壤对重金属离子吸附的作用^[13]。本文采用被广泛应用描述污染元素吸附的 Langmuir 公式定量描述纳米 TiO₂ 对重金属离子的吸附作用, 依据实测结果, 将不同含量纳米 TiO₂ 土壤的 Cu^{2+} 等温吸附曲线绘于图 4, 可以看出, 不同添加不同纳米 TiO₂ 含量的土壤对 Cu^{2+} 吸附性能差异很大。随着 Cu^{2+} 平衡浓度的增加, Cu^{2+} 吸附量呈增加的趋势, 均未达到吸附平衡。进一步分析图 4 可以看出, 相同 Cu^{2+} 平衡浓度下, 随着纳米 TiO₂ 含量的增加, Cu^{2+} 吸附量增加, 且增加量呈增加的趋势。说明纳米 TiO₂ 材料对重金属 Cu^{2+} 有很好的吸附作用, 对于改善土壤重金属污染具有重要意义。

为进一步观察纳米 TiO₂ 材料对重金属 Cu^{2+} 的吸附作用, 采用 Langmuir 等温方程对试验数据进行处理, 根据 Langmuir 线性方程式^[14], 以 $1/S$ 和 $1/c$ 为纵

横坐标作图, 由所绘曲线的斜率及截距求得最大吸附量 S_m 和分配系数 k 。结果见表 4, 决定系数 R^2 均大于 0.87, 达到显著水平 ($p < 0.01$), 有较好的相关性, 随纳米 TiO₂ 含量增加, 分配系数 k 及最大吸附量 S_m 均增大, 且 k 值较对照增加的百分比呈明显增大的趋势, 说明纳米 TiO₂ 对重金属 Cu^{2+} 有很好的吸附作用。

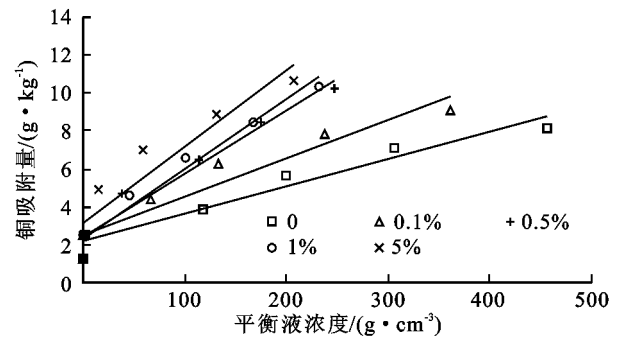


图 4 不同含量纳米 TiO₂ 对 Cu^{2+} 等温吸附曲线的影响

表 4 Langmuir 等温方程拟合参数				
纳米 TiO ₂ 含量/ (g · g ⁻¹)	S_m / (g · kg ⁻¹)	k / (L · g ⁻¹)	k 增大 百分比/%	R^2
0	12.64	0.264	0	0.902
0.001	12.98	0.360	0.266	0.801
0.005	13.32	0.451	0.415	0.951
0.01	13.83	0.522	0.494	0.736
0.05	14.44	0.792	0.667	0.838

3 结论

- (1) Philip 方程能较好地模拟添加纳米 TiO₂ 的黄绵土入渗过程; 入渗率随纳米 TiO₂ 含量增加呈减小趋势, 纳米 TiO₂ 含量为 5% 时, 对土壤入渗率影响极为显著, 纳米 TiO₂ 可以有效提高土壤保水性。
- (2) 相同的土壤水吸力下, 土壤含水量随纳米 TiO₂ 含量增加而增大。van Genuchten 模型能较好地拟合添加不同含量纳米 TiO₂ 的黄绵土水分特征曲线, 随纳米 TiO₂ 含量增加, 土壤进气吸力, 形状参数 n 均呈减小趋势。说明纳米 TiO₂ 材料对土壤的结构和质地产生了影响, 有效提高了土壤的持水性能。
- (3) 对流弥散方程 (CDE) 能较好地描述添加不同含量纳米 TiO₂ 的黄绵土溶质迁移过程, 随纳米 TiO₂ 含量增加, 弥散度增大, 完全穿透时间延长。因此纳米 TiO₂ 材料对土壤溶质迁移具有阻碍作用, 对缓解土壤养分流失具有重要意义。
- (4) 铜离子等温吸附曲线可以用 Langmuir 方程进行较好地描述, 随着纳米 TiO₂ 含量的增加, 最大吸附量 S_m 和分配系数 k 均增加, 且分配系数 k 增加的百分比呈明显增大的趋势, 说明纳米 TiO₂ 对重金属铜离子有很好的吸附作用, 可以有效地原位固定铜离子。

然草坡高 25%, 其 R_{rs} 表现为: 条播草木樨 > 撒播苜蓿 > 草木樨 > 苜蓿 > 自然草坡; 对于草田带状间轮作而言, 草木樨/农作物的 R_{rs} 较苜蓿/农作物高 4%, 其 R_{rs} 表现为: 草木樨/农作物 > 苜蓿/农作物, 且草田带状间轮作的 R_{rs} 明显高于牧草轮作。

参考文献:

- [1] 李子君, 周培祥, 毛丽华. 我国水土保持措施对水资源影响研究综述[J]. 地理科学进展, 2006, 25(4): 49-57.
- [2] 杨平. 水土保持在促进黄河水资源高效利用的作用[J]. 西北林学院学报, 2005, 20(3): 108-111.
- [3] 李玉山. 黄土高原治理开发与黄河断流的关系[J]. 水土保持通报, 1997, 17(6): 41-45.
- [4] 景可, 申元村. 黄土高原水土保持对未来地表水资源影响研究[J]. 中国水土保持, 2002, 238(1): 12-14.
- [5] 王飞. 人类活动对区域水土流失影响的定量评价[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2004.
- [6] 曹文洪. 黄土高原地区提倡节水型水土保持[J]. 中国水土保持科学, 2003, 1(1): 41-44.
- [7] 穆兴民, 李锐. 论水土保持在解决中国问题中的战略地位[J]. 水土保持通报, 1999, 19(3): 1-5.
- [8] 穆兴民, 王飞, 李锐. 水土保持是解决黄河问题的根本[N]. 中国水利报: 现代水利评论版, 2005-11-5(3).
- [9] 徐学选, 陈霖巍, 穆兴民, 等. 黄河中游水土保持措施对径流的影响[J]. 人民黄河, 2000, 22(7): 36-37.

- [10] 侯喜禄, 杜呈祥. 不同植被类型小区的径流泥沙观测分析[J]. 水土保持通报, 1990, 10(2): 33-38.
- [11] 刘国彬. 黄土高原草地土壤抗冲性及其机理研究[D]. 陕西杨凌: 中国科学院水利部水土保持研究所, 1996.
- [12] 刘元保, 唐克丽, 查轩, 等. 坡耕地不同地面覆盖的水土流试验研究[J]. 水土保持学报, 1990, 4(1): 25-29.
- [13] 冯浩, 吴淑芳, 吴普特, 等. 草地坡面径流调控放水试验研究[J]. 水土保持学报, 2005, 6(19): 23-25.
- [14] 王飞, 李锐, 穆兴民, 等. 渭河流域水土保持措施减沙水代价分异特征与水沙调节模拟[J]. 中国水土保持科学, 2004, 2(2): 12-17.
- [15] 王飞, 穆兴民, 李锐, 等. 河口镇到龙门区间水土保持措施减沙水代价分析[J]. 水土保持通报, 2005, 25(6): 28-32.
- [16] 焦菊英, 王万忠. 人工草地在黄土高原水土保持中的减水减沙效益与有效盖度[J]. 草地学报, 2001, 9(3): 176-184.
- [17] 王光谦, 张长春, 刘家宏, 等. 黄河流域多沙粗沙区植被覆盖变化与减水减沙效益分析[J]. 泥沙研究, 2006, 4(2): 10-16.
- [18] 王协康, 方铎. 植被措施控制水土流失机理及其效益研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2003, 32(2): 13-16.
- [19] 罗伟祥, 白立强, 宋西德, 等. 不同覆盖度林地和草地的径流量与冲刷量[J]. 水土保持学报, 1990, 2(1): 30-34.
- [20] 王万忠. 黄土地区降雨特性与土壤流失关系的研究[J]. 水土保持通报, 1983, 3(4): 7-13.
- [21] 蔡强国. 岔巴沟流域次暴雨产沙统计模型[J]. 地理研究, 2004, 23(4): 432-439.



(上接第 61 页)

参考文献:

- [1] 刘秀梅, 冯兆滨, 张树清, 等. 纳米—亚微米级复合材料对褐潮土有机无机复合体含量及各粒级复合体中 C, N, P 含量与分布的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(1): 57-63.
- [2] 李绍家, 刘凤书, 杨海云, 等. 紫胶改性的研究[J]. 林业科学研究, 1989, 2(3): 277-280.
- [3] 邱惠中. 纳米材料及其在航天领域中的应用[J]. 宇航材料工艺, 1996(2): 7-10.
- [4] 陈军辉, 尹华强, 刘勇军, 等. 纳米碳材料及在环境保护中的应用前景[J]. 化工环保, 2004, 24(Z1): 120-122.
- [5] 周建敏, 牛显春, 农兰平. 纳米 TiO_2 光催化处理城市生活废水的研究[J]. 水土保持研究, 2007, 14(5): 35-36.
- [6] 肖亚兵, 钱沙华, 黄淦泉, 等. 纳米二氧化钛对砷(Ⅲ)和砷(V)吸附性能的研究[J]. 分析科学学报, 2003, 19(2): 172-174.
- [7] Zheng Lei, Hong Fashui, Lu Shipeng, et al. Effect of nano- TiO_2 on strength of naturally aged seeds and

growth of spinach [J]. Biological Trace Element Research, 2005, 104(1): 83-91.

- [8] 刘键, 张阳德, 张志明. 纳米增效肥料对冬小麦产量及品质影响的研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(35): 15578-15580.
- [9] 刘键, 张阳德, 张志明. 纳米生物技术在水稻、玉米、大豆增产效益上的应用研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(36): 15814-15816.
- [10] 宋伟, 陈百明, 刘琳. 中国耕地土壤重金属污染概况[J]. 水土保持研究, 2013, 20(2): 293-298.
- [11] 文曼. 黄土高原地区生物炭的土壤水动力学效应[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
- [12] 高红贝, 邵明安. 温度对土壤水分运动基本参数的影响[J]. 水科学进展, 2011, 22(4): 484-494.
- [13] 王亚平, 潘小费, 岑况, 等. 汞和镉在土壤中的吸附和运移研究进展[J]. 岩矿测试, 2003, 22(4): 277-282.
- [14] Langmuir I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum [J]. Journal of the American Chemical Society, 1918, 40(9): 1361-1403.