

# 土壤团聚体与土壤侵蚀关系研究进展

王小云 (山西省水土保持科学研究所, 山西太原 030045)

**摘要** 从影响土壤团聚体稳定性的因素、团聚体对土壤侵蚀的影响和团聚体与养分流失的关系 3 个方面, 综述了土壤团聚体的研究进展。

**关键词** 土壤团聚体; 水稳性; 土壤可蚀性; 粒径组成

**中图分类号** S15 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2016)23-106-03

## Research Progress of the Relationship between Soil Aggregates and Soil Erosion

WANG Xiao-yun (Institute of Shanxi Soil and Water Conservation, Taiyuan, Shanxi 030045)

**Abstract** In order to provide materials for the study of soil erosion, research advances of soil aggregate were summarized from three aspects: influential factors on stability of soil aggregate, effects of aggregate on soil erosion, relationship between aggregate and nutrient loss.

**Key words** Soil aggregate; Water stability; Soil erodibility; Soil particle size

土壤侵蚀作为地球表面的一种自然现象<sup>[1]</sup>, 自人类社会出现后, 成为自然和人类活动共同作用的一种动态过程, 现已成为当今世界资源与环境问题的重点<sup>[2]</sup>。而土壤团聚体作为土壤的重要组成部分, 影响着土壤的物理化学性质。近年来, 国内外学者对土壤团聚体的形成、破碎特征、粒径组成、对土壤可蚀性和养分的影响等多方面进行了大量研究。笔者对这些研究从土壤团聚体稳定性影响因素、团聚体对土壤侵蚀和养分流失 3 方面进行了总结, 旨在为今后土壤侵蚀方面的研究提供借鉴。

### 1 土壤团聚体稳定性的影响因素

土壤团聚体是土壤结构的基本单元, 是土壤的重要组成部分。土地利用方式和土壤管理措施与土壤的结构性能密切相关, 不同土地利用方式对土壤养分、内部环境、生物活性及土壤团聚体的形成过程、团聚体的稳定性及粒径分布产生影响。团聚体具有不同的形态和大小, 通常将其分为 2 个部分: 大团聚体 ( $>250 \mu\text{m}$ ) 和微团聚体 ( $<250 \mu\text{m}$ )<sup>[3]</sup>。

近年来, 土壤研究者对土壤团聚体的形成机制、稳定性影响因素、与农业管理措施间的关系、团聚体的粒径组成与分布、有机质和养分含量的关系等方面做了大量研究<sup>[4-7]</sup>。土壤团聚体的稳定性主要与土壤有机质含量、土壤微生物、土地利用方式、全氮含量、全磷含量、蔗糖酶、矿物种类等相关<sup>[8-10]</sup>。同时, 国内外学者对土壤团聚体的稳定机制与影响因素做了大量研究。发现直径小于 0.05 mm 团聚体的数量与有机质的含量相关系数为 0.65~0.75。魏朝富等<sup>[11-12]</sup>对紫色土、红壤水稳性团聚体研究发现, 水稳性团聚体数量和稳定性均与土壤有机质的含量呈正相关<sup>[11-12]</sup>。姚贤良等<sup>[13-17]</sup>研究了红壤、黑土、棕壤、紫色土团聚体的胶结物质组成和存在状态, 认为有机无机复合和土粒团聚的关系是通过原土复合量和小于 0.01 mm 土粒团聚量的关系体现。国外学者研究发现, 土壤有机质中斥水胡敏酸可有效提高土壤团聚体的稳定性, 而且通过对施加矿质肥料和有机质对土壤

团聚体的影响的研究表明, 有机质超过一定含量后, 水稳性团粒不再随有机质含量的增加而增加, 而且有机质的排列对土壤团粒的稳定性发挥更大的作用。王文艳等<sup>[10]</sup>研究表明,  $>0.25 \text{ mm}$  的水稳性团聚体含量从坡顶到坡底逐渐升高, 而且水稳性团聚体含量与方解石含量呈正相关, 与正长石和钙长石含量呈负相关。Neergaardhe 等<sup>[18]</sup>研究认为, 真菌菌根和分支根瘤中根瘤菌可有效稳定土壤结构和提高土壤团聚体稳定性, 尤其是 VAM 菌丝及其分泌的土壤多糖(包括其他有机质)对土壤团聚体的形成具有重要影响。

土壤团聚体的特性和稳定性与土壤有机质、粒径组成、矿物种类与含量及微生物种群等多种因素相互作用和相互影响, 并呈单向关系。因此, 土壤团聚体对土壤的侵蚀性和养分吸附与运移过程具有重要影响, 可以作为表征土壤生态特性的重要指标<sup>[19]</sup>。

### 2 土壤团聚体对土壤侵蚀的影响

土壤团聚体的特性对土壤综合性能具有重要的代表意义, 对团聚体的稳定性、破碎重组、土壤的养分循环和土壤可蚀性和土壤可持续利用具有重要影响<sup>[20-21]</sup>。

团聚体的粒径分布和稳定性极大地影响着土壤的物理性质和土壤中发生的各种过程<sup>[22-23]</sup>。研究表明, 团聚体稳定性影响着土壤入渗、结皮、产沙等土壤侵蚀的各个过程<sup>[24]</sup>, 是预测土壤抗侵蚀能力的良好指标<sup>[25-27]</sup>, 同时团聚体的粒径组成和稳定性也是土壤侵蚀的重要指标<sup>[28]</sup>。田积莹等<sup>[29-34]</sup>在研究土壤可蚀性时发现, 土壤可蚀性取决于土壤水稳定性的团聚体数量和质量。同时, 陈山等<sup>[35]</sup>研究认为, 团聚体稳定性与平均重量直径间具有不同的变化趋势, 而且不同粒级团聚体之间差异较大, 甚至完全相反。而 Yan 等<sup>[36-38]</sup>在 WEEP 模型的基础上, 利用团聚体水稳性代替可蚀性因子建立了新的细沟和细沟间土壤侵蚀预测模型, 取得了良好效果。Li 等<sup>[39-40]</sup>对红壤团聚体的稳定性进行了深入研究, 证实了团聚体稳定性是红壤抗侵蚀能力的主要决定因素。由于团聚体的稳定性对土壤可蚀性具有重要意义, 因此团聚体稳定性的下降往往暗示土壤潜在可蚀性的增长及土壤肥力水平的下降<sup>[41]</sup>。20 世纪 30、40 年代国外学者先后提

**基金项目** 山西省水利科学技术研究与推广项目(201428)。

**作者简介** 王小云(1980-), 男, 山西兴县人, 高级工程师, 从事土壤侵蚀和面源污染科研工作。

**收稿日期** 2016-07-06

出了用黏粒率 (clayRatio) [黏粒率: (沙 + 粉沙)/黏粒, 黏粒率越小土壤越不容易侵蚀] 和土壤渗透性作为土壤可蚀性指标, 并进一步提出了团聚状况和团聚度指标。除此之外, 还提出了平均重量直径指标。Anderson 等提出的团聚体表面率和团聚体的稳定性及分散率等指标 [团聚体的表面率  $\geq 0.05$  mm 颗粒的表面积/团聚体的量 (粉沙 + 黏粒)]。Kazuhiko 和 Katsutoshi 研究发现, 团聚体的稳定性与土壤侵蚀量之间呈显著负相关, 其次是分散率和侵蚀率, 并指出团聚体的稳定性可作为暗色土的可蚀性指标。高维森等<sup>[42-43]</sup> 对不同类型土壤的可蚀性指标进行了测定分析, 指出最佳土壤可蚀性指标、 $> 0.25$  mm 水稳性团粒和风干土水稳性团粒含量是反映土壤可蚀性强弱的最佳指标。Tejada 等<sup>[44-45]</sup> 研究表明, 土壤结构稳定性指数降低, 土壤结构稳定性增强, 土壤可蚀性增强, 泥沙流失量减少。Colazod 对土壤团聚体与风蚀关系研究表明, 土壤团聚体稳定性降低, 土壤风蚀的可蚀性增加, 而对沙土和黏土无显著影响。不同尺度范围内模拟降雨的研究表明, 表层土壤团聚体含量和粒径与径流和土壤流失量具有显著相关性, 且不同降雨时间段差异显著, 甚至相反。

### 3 土壤团聚体与养分流失的关系

土壤的全氮含量反映了土壤供氮能力的大小, 在一定程度上也反映了土壤结构和土壤肥力状况的好坏, 也与土壤抗侵蚀能力有一定关系。在自然条件下, 土壤氮素含量与土壤团聚体特别是水稳性团聚体的含量关系密切。土壤水稳性团聚体含量与土壤全氮 (包括土壤速效氮) 含量随之增加, 其中土壤水稳性团聚体 (粒径  $> 0.25$  mm) 的含量增加幅度较大, 而土壤磷含量随着水稳性团聚体粒径的增加而增加<sup>[46]</sup>。

张超等<sup>[47]</sup> 研究表明, 根际土壤具有更好团聚结构, 且根际土壤分形特征能更好地反映土壤性质的变化规律, 可作为黄土丘陵区植被恢复过程中土壤质量评价的指标。黄满湘等<sup>[48-49]</sup> 对土壤团聚体中养分含量与粒径分布以及流失土壤对养分的富集和形态进行了研究。刘爱霞等<sup>[50]</sup> 对高速公路边坡土壤团聚体水稳性团聚体粒径的研究表明,  $> 1$  mm 的大团聚体表层含量大于亚表层, 而  $< 1$  mm 的团聚体则相反, 其中有机质、全氮、硝态氮、速效磷和  $1 \sim 5$  mm 粒径是影响分形维数的主要因子, 植被恢复促进团聚体均匀分布, 使土壤分形维数降低, 改善土壤结构。何淑勤等<sup>[51]</sup> 对茶园土壤团聚体粒级组成研究表明,  $0 \sim 20$  和  $20 \sim 40$  cm 土层土壤团聚体的分布均以  $> 2$  mm 和  $2 \sim 5$  mm 团聚体为主, 团聚体平均重量直径随着土壤层次的增加有增加的趋势。刘敏英等<sup>[52]</sup> 研究了植茶年限对土壤团聚体的影响, 结果表明: 植茶年限对团聚体大小分布状况无显著影响, 对团聚体总量表现为先增加后减少的趋势, 其中粒径  $> 5$  mm 和  $< 5$  mm 是水稳性团聚体随植茶年限增长的转折点。

土壤中至少有 70% ~ 90% 的磷进入土壤后会成为难以被作物吸收利用的固定形态磷<sup>[53-57]</sup>。农业中随径流流失的农田土壤养分是水体中磷的最主要来源<sup>[58-59]</sup>, 且地表径流携带的侵蚀泥沙对氮、磷等养分具有富集作用。土壤和侵蚀

泥沙中养分含量和分布与土壤团聚体粒级具有一定的相关性<sup>[60]</sup>, 同时不同粒径团聚体对磷的富集作用和富集系数不同<sup>[61-62]</sup>, 因此团聚体的粒径分布对养分的循环和运移具有重要影响。郭万伟等<sup>[63]</sup> 对旱土和水稻土团聚体和磷分布研究表明, 土壤磷的形态分布与团聚体粒级有密切关系, 旱土和水稻土以  $> 0.02$  mm 粒径的团聚体为主, 且在该级土壤团聚体中磷素含量较高, 且吸附态无机磷以 Fe-P 为主, 而  $< 0.02$  mm 团聚体以 O-P 为主。王洪杰等<sup>[64]</sup> 研究表明, 土壤全磷和有机质含量与粉粒间呈负相关, 与砂粒间呈正相关, 而氮则相反。

由于径流对泥沙搬运选择性机制造成的富集系数 (Enrichment Ratio, ER) 随侵蚀泥沙流失的增加而降低, 即降雨径流初期选择性搬运富含养分的黏粒及精细颗粒, 之后养分含量低的砂粒及大团聚体破碎分散出的细颗粒逐渐被搬运并进入泥沙<sup>[45,61]</sup>。黄雨等<sup>[65]</sup> 研究表明, 流失泥沙中  $< 0.02$  mm 的微团聚体和  $< 0.002$  mm 的黏粒是养分流失的主要载体, 且流失泥沙中微团聚体对磷的富集作用较强, 虽然富集系数与团聚体粒径、腐殖质含量有关<sup>[66]</sup>, 但养分总流失量随着土壤流失量的增加而增大<sup>[67-68]</sup>。胡宏祥等<sup>[69]</sup> 研究表明, 土壤磷养分流失总量的 87.37% 是通过径流泥沙携带方式造成的, 且吸附态磷是流失的主要形态<sup>[70-72]</sup>。

### 参考文献

- [1] 张洪江. 土壤侵蚀原理[M]. 北京: 中国林业出版社, 1999: 2-9.
- [2] 唐克丽, 史立人, 史德明, 等. 中国水土保持[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 20-58.
- [3] TISDALL J M, OADES J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. Journal of soil science, 1982, 33: 141-163.
- [4] 文倩, 赵小蓉, 张书美, 等. 半干旱地区不同土壤团聚体中微生物量的分布特征[J]. 中国农业科学, 2005, 38(2): 327-332.
- [5] 张超, 刘国彬, 薛蕙, 等. 黄土丘陵区不同植被类型根际土壤团聚体及颗粒分形特征[J]. 中国农业科学, 2011, 44(3): 507-515.
- [6] 史正军, 张朝, 卢瑛. 深圳不同植被类型城市土壤团聚体组成与分形特征[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(3): 124-127.
- [7] AN S S, MENTLER A, MAYER H, et al. Soil aggregation, aggregate stability, organic carbon and nitrogen in different soil aggregate fractions under forest and shrub vegetation on the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2010, 81: 226-233.
- [8] 李小刚. 甘肃景电灌区土壤团聚体特征研究[J]. 土壤学报, 2000, 37(2): 263-270.
- [9] 卢金伟. 土壤团聚体水稳性及其与土壤可蚀性之间关系研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2002.
- [10] 王文艳, 张丽萍, 刘俏, 等. 黄土中主要矿物构成对土壤抗蚀性的影响及空间变异[J]. 水土保持学报, 2013, 27(4): 7-11.
- [11] 魏朝富, 高明, 谢德体, 等. 有机肥对紫色水稻土水稳性团聚体的影响[J]. 土壤通报, 1995, 26(3): 114-116.
- [12] 章明奎, 何振力, 陈国潮, 等. 利用方式对红壤水稳性团聚体形成的影响[J]. 土壤学报, 1997, 34(4): 359-365.
- [13] 姚贤良, 于德芳. 有机肥料及其利用方式对土壤结构的影响[J]. 土壤学报, 1985, 22(3): 241-249.
- [14] 关连珠, 张伯泉, 颜丽. 不同肥力黑土、棕壤微团聚体的组成及其胶结物质研究[J]. 土壤学报, 1991, 28(3): 260-266.
- [15] 魏朝富, 谢德体, 陈世正. 紫色水稻土有机无机复合与土壤团聚的关系[J]. 土壤学报, 1996, 33(1): 70-76.
- [16] 黄丹丹. 不同耕作方式下黑土团聚体及胶结物质组成的研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2012.
- [17] 冷延慧. 长期施肥对棕壤、黑土团聚体组成及其稳定性的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2008.
- [18] NEERGAADHE B, PETERSEN L. Influence of arbuscular mycorrhizal fungus on soil structure and aggregate stability of vertisol [J]. Plant and soil, 2000, 218: 173-183.

- [19] 陈恩凤,周礼措,武冠云. 微团聚体的保肥供肥性能及其组成比例在评判土壤肥力水平中的意义[J]. 土壤学报,1994,31(1):18-25.
- [20] 周虎,吕胎忠,李保国. 土壤结构定量化研究进展[J]. 土壤学报,2009,46(3):501-506.
- [21] MADARI B, MACHADO P L O A, TORRES E, et al. No tillage and crop rotation effects on soil aggregation and organic carbon in a Rhodic Ferral soil from southern Brazil[J]. Soil and tillage research, 2005, 80:185-200.
- [22] MISRA R K, TEIXEIRA P C. The sensitivity of erosion and erodibility of forest soils to structure and strength[J]. Soil & tillage research, 2001, 59: 81-93.
- [23] ZHANG G S, CHAN K Y, OATES A, et al. Relationship between soil structure and runoff/soil loss after 24 years of conservation tillage[J]. Soil & tillage research, 2007, 92:122-128.
- [24] MARTÍNEZ - MENA M, DEEKS L K, WILLIAMS A G. An evaluation of a fragmentation fractal dimension technique to determine soil erodibility [J]. Geoderma, 1990, 90(1):87-98.
- [25] BARTHÈS B, ROOSE E. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion: Validation at several levels [J]. Catena, 2002, 47:133-149.
- [26] VALMIS S, DIMOYIANNIS D, DANALATOS N G. Assessing interrill erosion rate from soil aggregate instability index, rainfall intensity and slope angle on cultivated soils in central Greece [J]. Soil & tillage research, 2005, 80:139-147.
- [27] DIMOYIANNIS D, VALMIS S, DANALATOS N G. Interrill erosion on cultivated Greek soils: Modelling sediment delivery [J]. Earth surface processes and landforms, 2006, 31:940-949.
- [28] COLAZO J C, BUSCHIAZZO D E. Soil dry aggregate stability and wind erodible fraction in a semiarid environment of Argentina [J]. Geoderma, 2010, 159:228-236.
- [29] 田积莹, 黄义瑞. 子午岭连家坨地区土壤物理性质与土壤抗侵蚀性能指标的初步研究[J]. 土壤学报, 1964, 12(3):286-295.
- [30] 余清珠, 师明洲. 半干旱黄土丘陵沟壑区人工混交林土壤可蚀性研究初报[J]. 水土保持通报, 1990, 10(5):5-9.
- [31] 郭培才, 张振中, 杨开宝. 黄土区土壤可蚀性预报及评价方法研究[J]. 水土保持学报, 1992, 6(3):48-58.
- [32] 蒋定生, 范兴科, 李新华, 等. 黄土高原水土流失严重地区土壤抗冲性的水平和垂直变化规律研究[J]. 水土保持学报, 1995, 9(2):1-8.
- [33] 王峰, 石辉, 郭周立江, 等. 土壤抗冲性研究进展[J]. 山地农业生物学报, 2010, 29(6):528-537.
- [34] 王丹丹, 张建军, 茹豪, 等. 晋西黄土高原不同地类土壤抗虫性研究[J]. 水土保持学报, 2013, 27(3):28-38.
- [35] 陈山. 不同利用方式土壤团聚体稳定性及其与有机质和铁铝氧化物的关系[D]. 武汉:华中农业大学, 2012.
- [36] YAN F L, SHI Z H, LI Z X, et al. Estimating interrill soil erosion from aggregate stability of Ultisols in subtropical China [J]. Soil Tillage Res, 2008, 100:34-41.
- [37] SHI Z H, YAN F L, LI Z X, et al. Interrill erosion from disturbed and undisturbed samples in relation to topsoil aggregate stability in red soils from subtropical China [J]. Catena, 2010, 81:240-248.
- [38] WANG J G, CAI C F, LI Z X, et al. Effects of transport distance and flow discharge of overland flow on destruction of Ultisol aggregates [J]. Particology, 2012, 10:607-613.
- [39] LI Z X, CAI C F, SHI Z H, et al. Aggregate stability and its relationship with some chemical properties of red soils in subtropical China [J]. Pedosphere, 2005, 15:129-136.
- [40] WANG X Y, ZHANG L P, ZHANG H S, et al. Phosphorus adsorption characteristics at the sediment-water interface and relationship with sediment properties in FUSHI reservoir, China [J]. Environmental earth sciences, 2012, 67:15-22.
- [41] BARTHÈS B, ROOSE E. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion: validation at several levels [J]. Catena, 2002, 47(10):133-149.
- [42] 高维森. 土壤抗蚀性指标及其适用性初步研究[J]. 水土保持学报, 1991(2):60-65.
- [43] 郭培才, 张振中, 杨开宝. 黄土区土壤可蚀性预报及评价方法研究[J]. 水土保持学报, 1992(3):48-51.
- [44] TEJADA M, GONZALEZ J L. Influence of organic amendments on soil structure and soil loss under simulated rain [J]. Soil and tillage research, 2007, 93(1):197-205.
- [45] 于兴修, 马骥, 刘前进, 等. 不同覆被土壤结构稳定性对侵蚀泥沙氮磷流失的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4):12-16.
- [46] 卢金伟. 土壤团聚体水稳定性及其与土壤可蚀性之间关系研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2002.
- [47] 张超, 刘国彬, 薛蕙, 等. 黄土丘陵区不同植被类型根际土壤微团聚体及颗粒分形特征[J]. 中国农业科学, 2011, 44(3):507-515.
- [48] 黄满湘, 章申, 晏维金. 农田暴雨径流侵蚀泥沙对氮磷的富集机理[J]. 土壤学报, 2003, 40(2):306-310.
- [49] 杨华, 龙健, 李兆君, 等. 土地利用方式对红枫湖入湖流域土壤团聚体磷含量及其形态的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(11):2214-2220.
- [50] 刘爱霞, 高照良, 李永红, 等. 关中平原高速公路边坡不同植被恢复年限土壤团聚体分形特征研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(1):219-223, 237.
- [51] 何淑勤, 郑子成, 杨玉梅. 茶园土壤团聚体分布特征及其对有机碳含量影响的研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(5):187-190.
- [52] 刘敏英, 郑子成, 李廷轩. 不同植茶年限土壤团聚体的分布特征及稳定性研究[J]. 茶叶科学, 2012, 32(5):402-410.
- [53] 刘建玲, 张福锁. 小麦-玉米轮作长期肥料定位试验中土壤磷库的变化: II. 土壤 Olsen -P 及各种形态无机磷的动态变化[J]. 应用生态学报, 2000, 11(3):365-368.
- [54] 章爱群, 贺立源, 赵会娥, 等. 有机酸对土壤无机磷转化和速效磷的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(8):4061-4069.
- [55] BUTLER J S, COALE F J. Phosphorus leaching in manure-amended Atlantic coastal plain soils [J]. Environmental quality, 2005, 34:370-381.
- [56] 寇长林, 王秋杰, 任丽轩, 等. 小麦和花生利用磷形态差异的研究[J]. 土壤通报, 1999, 30(4):181-184.
- [57] SHARPLEY A N, WELD J L, BEEGLE D B, et al. Development of phosphorus indices for nutrient management planning strategies in the United States [J]. Journal of soil and water conservation, 2003, 58(3):137-152.
- [58] SHOBER A L, SIMS J T. Integrating phosphorus source and soil properties into risk assessments for phosphorus loss [J]. Soil science society of America journal, 2007, 71(2):551-560.
- [59] VAN DER MOLEN D T, BREEUWSMA A, BOERS P C M. Agricultural nutrient losses to surface water in the Netherlands: Impact, strategies, and perspectives [J]. Journal of environmental quality, 1998, 27(1):4-11.
- [60] 张水龙, 庄季屏. 农业非点源污染研究现状与发展趋势[J]. 生态学杂志, 1998, 17(6):51-55.
- [61] 黄满湘, 章申, 晏维金. 农田暴雨径流侵蚀泥沙对氮磷的富集机理[J]. 土壤学报, 2003, 40(2):306-310.
- [62] 晏维金, 章申, 唐以剑. 模拟降雨条件下沉积物对磷的富集机理[J]. 环境科学学报, 2000, 20(3):332-337.
- [63] 郭万伟, 肖和艾, 吴金水, 等. 红壤旱土和水稻土团聚体中磷素的分布特点[J]. 土壤学报, 2009, 46(1):85-92.
- [64] 王洪杰, 李宪文, 史学正, 等. 不同土地利用方式下土壤养分的分布及其与土壤颗粒组成关系[J]. 水土保持学报, 2003, 17(2):44-50.
- [65] 黄丽, 树文, 董舟, 等. 三峡库区紫色土养分流失的试验研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(1):8-21.
- [66] 王而力, 王嗣洪, 徐颖. 沙土不同粒径微团聚体对磷的富集特征[J]. 环境科学学报, 2013, 33(3):827-834.
- [67] 康玲玲, 朱小勇, 王云璋, 等. 不同雨强条件下黄土性土壤养分流失规律研究[J]. 土壤学报, 1999, 36(4):536-543.
- [68] 白红英, 唐克丽, 陈文亮, 等. 坡地土壤侵蚀与养分流失过程的研究[J]. 水土保持通报, 1991, 11(3):14-19.
- [69] 胡宏祥, 洪天求, 刘路. 水土流失量和养分流失量的预测[J]. 环境科学学报, 2009, 22(3):356-361.
- [70] DOUGHERTY W J, MASON S D, BURKITT L L, et al. Relationship between phosphorus concentration in surface runoff and a novel soil phosphorus test procedure (DGT) under simulated rainfall [J]. Soil research, 2011, 49(6):523-528.
- [71] 张洪, 单保庆, 尹澄清, 等. 六叉河小流域不同景观结构中径流磷形态差异分析[J]. 环境科学学报, 2008, 28(3):550-557.
- [72] 齐其功, 刘鸿亮, 沈珍瑶, 等. 三峡库区典型小流域氮磷流失特征[J]. 环境科学学报, 2007, 27(2):326-331.