

黄土高原不同土地利用方式对土壤 养分与酶活性的影响

岳庆玲^{1,2}, 常庆瑞¹, 刘 京¹, 刘梦云¹, 王德彩¹

(1 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2 河南科技学院 资源与环境学院, 河南 新乡 453003)

[摘 要] 为了研究吴旗县不同土地利用方式对土壤养分以及酶活性的影响, 对农耕地、天然草地、人工草地、灌木林地和乔木林地 5 种土地利用方式的土壤进行了调查、样品测定和分析。结果表明, 天然草地和乔木林地 0~20 cm 表层土壤有机质增长率均较大, 为 36.11% 和 32.96%, 二者碱解氮含量也较高, 分别为 66.88 和 69.37 mg/kg; 乔木林地和灌木林地 0~20 cm 表层土壤有效磷含量均高于天然草地和人工草地, 乔木林地速效钾含量最高。乔木林地 0~20 cm 土层土壤脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶 3 种水解酶活性均高于其他 4 种土地利用方式, 0~20 cm 土层土壤酶活性均高于 20~40 cm 土层, 表明人工种植乔木林可以使土壤水解酶活性增强, 尤其表现在表层土壤。总之, 乔木林对土壤有机质和养分、酶活性的增强效应最为明显。

[关键词] 黄土高原; 土地利用方式; 土壤养分; 酶活性

[中图分类号] S158.3

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2007)12-0103-06

Effect of different land utilization on soil nutrient and soil enzyme in Loess Plateau

YUE Qing-ling^{1,2}, CHANG Qing-rui¹, LIU Jing¹, LIU Meng-yun¹, WANG De-cai¹

(1 College of Resources Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 College of Resources and Environment, He'nan Institute of Science and Technology, Xinxiang, He'nan 453003, China)

Abstract: To study the effects of different land utilization on soil fertility and enzyme activity in Wuqi county, the research was designed to deal with the different land utilization by the survey of the soil vegetation, the sample test and the indoor analysis. The results indicated that the content of organic matter of the natural meadow and the arbor forest land in the 0—20 cm surface soil grew separately by 36.11% and 32.96%; the nitrogen content of the natural meadow and the arbor forest land was also high, being 66.88 mg/kg and 69.37 mg/kg, respectively; the content of fast-acting potassium in the surface soil was higher than that of meadow, while the activity of the urea enzyme, alkaline phosphatase and sucrase of the arbor forest land was stronger than that of the other four land utilization modes. Enzyme activities in 0—20 cm layer were stronger than those in the 20—40 cm layer, which showed that the manual-planted arbor forest could make the soil hydrolytic enzyme activities strong, especially in the surface layer. In short, the arbor forest land could enhance soil organic matter, nutrients and enzyme activities significantly.

Key words: Loess Plateau; land utilization mode; soil nutrition; enzyme activity

* [收稿日期] 2006-11-06

[基金项目] 国家自然科学基金项目(30571527); 国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAD03A0308)

[作者简介] 岳庆玲(1977—), 女, 河北邯郸人, 博士, 主要从事土地资源与空间信息技术研究。E-mail: yueqingling@163.com

[通讯作者] 常庆瑞(1959—), 男, 陕西子洲人, 教授, 博士生导师, 主要从事资源环境与 3S 技术应用研究。

E-mail: Changqr@nwsuaf.edu.cn

不同土地利用方式将引起土壤性质(如土壤物理、化学和生物学特性)的变化,合理的土地利用方式可以改善土壤结构,增强土壤对外界环境变化的抵抗力。土壤酶在土壤物质转化和能量转化过程中起着重要的催化作用,使生态系统的各组分间具有功能上的联系,保持了土壤生物化学的相对稳衡状态,催化土壤中的一切生物化学反应,其活性大小是土壤肥力的重要标志^[1-3]。吴旗县作为全国最早实施退耕还林措施的国家重点示范县,但相关研究主要集中在土壤干层、植被群落重建和生物多样性方面^[4-5],对干旱气候条件下土壤酶与土壤养分的关系,以及不同土地利用方式下土壤酶的活性强度研究甚少。本研究针对不同土地利用方式下土壤养分和土壤酶活性进行了系统分析与数据统计,以期寻求提高土壤质量的最佳土地利用方式,为土壤生态的进一步恢复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域自然概况

研究区位于延安地区西北部的吴旗县(36°33′~37°24′N,107°28′~108°32′E),海拔 1 233~1 809 m,该县总面积为 3 791.5 km²,属陕北黄土高原梁状丘陵沟壑区。该区属温带大陆性干旱季风气候,年平均气温为 7.8℃,极端最高气温为 37.1℃,极端最低气温为 -25.1℃。年均降雨量为 478.3 mm,降水年变化率大,降水季节分配不均,5~10 月降水量占全年降水量的 80%以上。春季干旱多风,夏季旱涝相间,秋季温凉湿润,冬季寒冷干燥,冰雹为主要灾害。无霜期为 147 d 左右。土壤为地带性黑垆土剥蚀后广泛发育在黄土母质上的黄绵土,土壤肥力低下,生产力水平极低。研究区内天然植被极少,大部分为耕地和荒草。

1.2 研究方法

1.2.1 样区选择 为了研究吴旗县不同土地利用方式对土壤性状的影响,根据生态学和土壤发生学理论,依据黄土高原生态环境和水土流失状况,选择 5 种土地利用方式作为典型采样区,其中包括耕地(23 个)、天然草地(10 个)、人工草地(6 个)、灌木林地(23 个)和乔木林地(23 个)。取样层次为土壤剖面 0~20 cm 和 20~40 cm,每个样点设置 3 个重复。将 3 个重复的土样去除根系和石块,充分混匀后用四分法取约 1 kg 的土样,带回实验室进行化验分析。以耕地土壤样品为对照(CK),调用 ANOVA 过程进行方差分析,选择 DUNCAN 新复极差

法进行差异显著性检验^[6]。其中,人工草地以紫花苜蓿(*Medicago sativa*)为主,灌木林地主要有柠条(*Caragana intermedia*)和沙棘(*Hippophae rhamnoides*),乔木林地主要有小叶杨(*Populus simonii*)、山杏(*Prunus armeniaca*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)和刺槐(*Robinia pseudoacacia*)。

1.2.2 测定项目及方法 根据土壤质量特性和表征肥力状况的指标,选择土壤养分(有机质、碱解氮、有效磷、速效钾、全氮、全磷、全钾、pH 值、CaCO₃ 和阳离子交换量(CEC))和酶活性(脲酶、过氧化氢酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶)作为反映土壤肥力质量的主要指标,进行分析测试。其中,脲酶活性以 24 h 后 1 g 土壤中 NH₄⁺-N 的毫克数表示,过氧化氢酶活性以 20 min 后 1 g 土壤中 0.02 mol/L 高锰酸钾的毫升数表示,碱性磷酸酶活性以 24 h 后 1 g 土壤中 P₂O₅ 的毫克数表示,蔗糖酶活性以 24 h 后 1 g 土壤中葡萄糖的毫克数表示。测定项目均采用常规方法^[7-8]。

2 结果与分析

2.1 5 种土地利用方式下土壤有机质和养分含量的变化

2.1.1 土壤有机质 土壤有机质被认为是土壤质量一个重要的指示指标,它是土壤养分的源与库,能改善土壤的物理和化学性状,促进土壤生物活性。不同土地利用方式下土壤有机质含量见表 1。表 1 表明,在 5 种土地利用方式中,0~20 cm 表层土壤平均有机质含量表现为:天然草地>乔木林地>灌木林地>人工草地>农耕地,且差异达显著水平。与农耕地相比,天然草地、乔木林地、灌木林地和人工草地的增长率分别为 36.11%,32.96%,23.50%和 20.55%。表明植树种草使土壤有机质含量明显增加,这是由于每年都有大量的枯枝落叶归还于土壤所致。

2.1.2 土壤氮素 氮素是构成蛋白酶的主要成分,在成土过程中由生物的固氮作用积累而成,是评价土壤氮素肥力的一个重要指标。表 2 表明,(1)不同土地利用方式下,0~20 cm 表层土壤碱解氮含量变化次序为:乔木林地>天然草地>人工草地>灌木林地>农耕地。表明乔木林地和天然草地有利于提高 0~20 cm 土层土壤碱解氮含量。20~40 cm 土层土壤碱解氮含量变化依次为:天然草地>农耕地>乔木林地>人工草地>灌木林地。天然草地不仅 0~20 cm 土层土壤碱解氮含量高,而且在 20~40 cm 土

层土壤碱解氮含量也较其他几种土地利用方式高，表明天然草地有利于 0~40 cm 土层土壤碱解氮的恢复。(2)0~20 cm 表层土壤全氮含量为 0.40~0.61 g/kg,变化幅度较小,其中天然草地土壤全氮含量最高,其次是乔木林地、灌木林地、农耕地和人工草地土壤全氮含量依次减少;20~40 cm 土层土壤全氮含量表现为天然草地>农耕地>乔木林地>

人工草地>灌木林地。农耕地虽然 0~20 cm 表层土壤全氮含量不是最高,但 20~40 cm 含量高于乔木林地、人工草地和灌木林地,这与农耕地施用氮肥及良好的管理措施等有关。天然草地和乔木林地的枯枝落叶层经腐殖化可补充土壤养分的耗竭,增加土壤中氮素的积累量,故其土壤全氮含量也较高。

表 1 5 种土地利用方式下 0~20 cm 土层土壤有机质含量的变化
Table 1 Soil organic matter variety in five land utilization modes(0~20 cm)

土地利用方式 Land utilization	有机质 Organic matter			较农耕地增长率/% Rate of in crement than farmland
	平均值/(g·kg ⁻¹) Mean	标准差 SD	变异系数/% CV	
天然草地 Natural meadow	13.38 a	3.15	23.55	36.11
人工草地 Artificial meadow	11.85 d	2.99	33.65	20.55
灌木林地 Bush forest land	12.14 c	2.62	27.37	23.50
乔木林地 Arbor forest land	13.07 b	4.10	31.33	32.96
农耕地 Farmland	9.83 e	3.07	31.24	

注:同列数据后不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。
Note: Different small letters in same line indicate significant difference ($P<0.05$).

表 2 5 种土地利用方式下 0~40 cm 土层土壤养分的分布与变化
Table 2 Distribution and variety of soil nutrient in five land utilization modes(0~40 cm)

土地利用 方式 Land utilization	土层 深度/cm Depth	碱解氮 Available N		全氮 Total N		有效磷 Available P	
		平均值/ (mg·kg ⁻¹) Mean	变异系数/% CV	平均值/ (g·kg ⁻¹) Mean	变异系数/% CV	平均值/ (mg·kg ⁻¹) Mean	变异系数/% CV
农耕地 Farmland	0~20	40.93	33.13	0.42	30.69	10.94	90.15
	20~40	37.80	43.57	0.34	33.70	3.52	38.50
天然草地 Natural meadow	0~20	66.88	31.52	0.61	20.29	3.70	24.56
	20~40	43.20	46.78	0.44	30.51	2.51	29.28
人工草地 Artificial meadow	0~20	54.67	33.85	0.40	23.71	3.95	27.75
	20~40	31.24	27.09	0.31	44.59	2.63	19.06
灌木林地 Bush forest land	0~20	51.26	51.43	0.44	36.10	4.90	46.52
	20~40	30.3	33.33	0.28	37.51	2.31	54.38
乔木林地 Arbor forest land	0~20	69.37	29.28	0.55	30.55	4.34	34.55
	20~40	33.40	46.40	0.33	33.47	2.32	53.30

土地利用 方式 Land utilization	土层 深度/cm Depth	全磷 Total P		速效钾 Available K		全钾 Total K	
		平均值/ (g·kg ⁻¹) Mean	变异系数/% CV	平均值/ (mg·kg ⁻¹) Mean	变异系数/% CV	平均值/ (g·kg ⁻¹) Mean	变异系数/% CV
农耕地 Farmland	0~20	0.62	31.57	96.48	51.87	17.92	12.29
	20~40	0.63	35.91	57.90	42.23	17.11	13.54
天然草地 Natural meadow	0~20	0.57	40.18	93.67	27.67	18.23	8.71
	20~40	0.53	43.54	49.17	30.74	18.11	8.82
人工草地 Artificial meadow	0~20	0.63	29.96	71.00	33.65	17.46	8.52
	20~40	0.60	34.23	2.63	41.40	17.91	6.86
灌木林地 Bush forest land	0~20	0.53	31.48	89.26	42.80	17.04	12.59
	20~40	0.48	36.32	37.35	25.72	17.06	11.74
乔木林地 Arbor forest land	0~20	0.66	22.73	124.48	27.27	17.34	11.16
	20~40	0.58	36.12	45.58	23.40	16.89	7.05

2.1.3 土壤磷素和钾素 由表 2 可以看出,在 5 种土地利用方式中,农耕地 0~20 cm 土层和 20~40 cm 土层土壤有效磷含量均最高,分别达 10.94 和 3.52 mg/kg,这可能是由于农田施用磷肥所致。此

外,灌木林地和乔木林地 0~40 cm 土层土壤有效磷含量分别为 2.31~4.90 和 2.32~4.34 mg/kg,变化幅度较大,且高于天然草地和人工草地,表明灌木林地和乔木林地对提高土壤有效磷含量有明显效

果。0~40 cm 土层土壤全磷含量为 0.48~0.66 g/kg,其中农耕地较高,平均值为 0.625 g/kg。由于磷的难移动性及磷在土壤中的双核化(转化为双核结构),以及植物吸收作用的增强,所以表层土壤全磷含量往往较下层高,但变化不大^[8]。5 种土地利用方式中,0~20 cm 土层土壤速效钾含量差异较大,其中乔木林地最高,为 124.48 mg/kg,其次是农耕地和天然草地,分别为 96.48 和 93.67 mg/kg,灌木林地和人工草地相对较低,分别为 89.26 mg/kg 和 71.00 mg/kg。

2.1.4 土壤 CEC、pH 和 CaCO₃ 含量 土壤阳离子交换量(CEC)反映土壤胶体中负电荷的多少及对阳离子性养分离子吸附能力的大小,即代表土壤保肥力的强弱。土壤阳离子交换量与土壤有机质及粘粒含量等因素有关,有机质含量高,CEC 随之升高。由图 1 可以看出,5 种土地利用方式下 0~20 cm 土层土壤 CEC 为 7.42~8.13 cmol/kg,其中乔木林地最高,为 8.13 cmol/kg,其次为天然草地>灌木林地>人工草地>农耕地,CEC 与有机质含量基本呈正相关关系。图 2 表明,在 5 种土地利用方式下,土壤 pH 值为 8.08~8.13,且各土地利用方式下的

pH 大小依次为灌木林地>农耕地>乔木林地>人工草地>天然草地。0~20 cm 土层土壤 pH 值小于 20~40 cm 土层,即表现为表层土壤 pH 值相对较低,酸性强于表下层,这和根系分泌有机酸、腐殖质分解等因素密不可分。图 3 显示,人工草地土壤 CaCO₃ 含量最高,为 120.77 g/kg;乔木林地次之,为 113.41 g/kg,农耕地最低,为 107.61 g/kg。

图 1 5 种土地利用方式下 0~20 cm 土层土壤的 CEC
A. 农耕地;B. 天然草地;C. 人工草地;D. 灌木林地;E. 乔木林地
Fig. 1 CEC content in five utilization modes(0—20 cm)
A. Farmland;B. Natural meadow;C. Artificial meadow;
D. Bush forest land;E. Arbor forest land

图 2 5 种土地利用方式下 0~40 cm 土层土壤 pH
A. 农耕地;B. 天然草地;C. 人工草地;D. 灌木林地;E. 乔木林地
Fig. 2 pH in five utilization modes(0—40 cm)
A. Farmland;B. Natural meadow;C. Artificial meadow;
D. Bush forest land;E. Arbor forest land

2.2 5 种土地利用方式下土壤酶活性的变化
2.2.1 土壤酶活性的差异 脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶是土壤的几种主要水解酶类,其中脲酶是催化尿素水解的惟一酶,脲酶活性变化与土壤氮素状况及土壤理化性状有关^[9]。

由表 3 可以看出,0~20 cm 土层土壤脲酶活性表现为:乔木林地和灌木林地均较高,分别为 11.44 和 11.32 mg/(g·d),其次是天然草地和农耕地,人工草地最低;20~40 cm 土层土壤脲酶活性表现为:

图 3 5 种土地利用方式下 0~20 cm 土层土壤 CaCO₃ 含量
A. 农耕地;B. 天然草地;C. 人工草地;D. 灌木林地;E. 乔木林地
Fig. 3 CaCO₃ content in five utilization modes (0—20 cm)
A. Farmland;B. Natural meadow;C. Artificial meadow;
D. Bush forest land;E. Arbor forest land

灌木林地>农耕地>乔木林地>天然草地>人工草地。不同土地利用方式下过氧化氢酶活性差异较小,除农耕地外,其他利用方式下 0~20 cm 土层土壤过氧化氢酶活性大于 20~40 cm 土层,说明过氧化氢酶可能受制于植被根际枯落物的分解释放。不同土地利用方式下,0~20 cm 土层土壤碱性磷酸酶活性表现为:乔木林地最高,为 46.01 mg/(g·d),其次为灌木林地、人工草地和农耕地,天然草地最低,且差异显著;20~40 cm 土层土壤碱性磷酸酶活

性差异较小。0~20 cm 土层土壤蔗糖酶活性表现为:乔木林地>灌木林地>农耕地>人工草地>天然草地,其中乔木林地 0~20 cm 土层土壤蔗糖酶活性是 20~40 cm 土层的 6.5 倍;5 种土地利用方式下,蔗糖酶活性表现为 0~20 cm 土层大于 20~40 cm 土层。

2.2.2 土壤酶活性和土壤养分之间的相关性 土壤酶活性与土壤养分之间有密切的相关关系,土壤

酶活性可以作为土壤肥力的指标,对 5 种土地利用方式下土壤酶活性与土壤主要肥力因素(土壤主要养分含量)进行相关性分析,结果见表 4。表 4 表明,脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶与土壤有机质、碱解氮、全氮和速效钾含量均呈极显著正相关,过氧化氢酶活性仅与土壤有机质含量呈显著相关,与其他养分含量无显著相关性。

表 3 5 种土地利用方式下 0~40 cm 土层土壤酶活性的分布特征

Table 3 Distribution characteristic of soil enzyme in five land utilization modes(0—40 cm)

土地利用方式 Land utilization	土层深度/cm Depth	脲酶/ (mg·g ⁻¹ ·d ⁻¹) Urease	过氧化氢酶/ (mL·g ⁻¹) Catalase	碱性磷酸酶/ (mg·g ⁻¹ ·d ⁻¹) Alkaline phosphatase	蔗糖酶/ (mg·g ⁻¹ ·d ⁻¹) Invertase
农耕地	0~20	7.55 d	19.84 e	19.23 d	18.02 c
Farmland	20~40	4.87 b	20.21 c	7.87 c	4.97 a
天然草地	0~20	8.59 c	21.78 a	18.34 e	8.55 e
Natural meadow	20~40	3.34 d	20.51 a	7.98 b	2.54 d
人工草地	0~20	6.99 e	20.91 d	20.87 c	15.22 d
Artificial meadow	20~40	2.29 e	19.78 d	5.04 d	1.66 e
灌木林地	0~20	11.32 b	21.39 c	29.56 b	24.04 b
Bush forest land	20~40	5.53 a	20.35 b	9.35 a	4.45 c
乔木林地	0~20	11.44 a	21.54 b	46.01 a	31.55 a
Arbor forest land	20~40	4.06 c	18.92 e	7.99 b	4.85 b

注:同列数据后不同小写字母表示同一土层不同土地利用方式间差异显著($P<0.05$)。
Note: Different small letters in the same row mean significantly statistical difference ($P<0.05$) between them.

表 4 5 种土地利用方式下土壤酶活性与土壤养分间的相关性

Table 4 Correlative coefficient between soil enzyme and nutrition in five land utilization modes

项目 Item	有机质 Organic matter	碱解氮 Available N	全氮 Total N	有效磷 Available P	全磷 Total P	速效钾 Available K	全钾 Total K
脲酶 Urease	0.784**	0.781**	0.857**	0.383	0.351	0.842**	0.224
过氧化氢酶 Catalase	0.680*	0.380	0.417	-0.057	0.192	0.424	0.053
碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase	0.874**	0.828**	0.848**	0.338	0.301	0.896**	0.190
蔗糖酶 Invertase	0.863**	0.858**	0.935**	0.499	0.345	0.956**	0.288

注:* * 表示 $P<0.01$; * 表示 $P<0.05$ 。表 5 同。
Note: * * $P<0.01$; * $P<0.05$. The same as table 5.

2.2.3 土壤酶活性之间的相关系数 表 5 表明,不同土地利用方式下土壤酶活性之间的相关程度较密切,其中脲酶与碱性磷酸酶和蔗糖酶、碱性磷酸酶与蔗糖酶活性之间存在极显著正相关关系,相关系数分别为 0.916,0.911 和 0.968;过氧化氢酶与脲酶

和碱性磷酸酶活性之间呈显著正相关关系,相关系数分别为 0.745 和 0.676。过氧化氢还原酶和 3 种水解酶在促进土壤有机质的转化及参与土壤物质转化和能量交换中,不仅显示其专有特性,同时还存在着共性关系。这与前人研究结果相一致^[10-12]。

表 5 5 种土地利用方式下土壤酶活性之间的相关系数

Table 5 The correlative coefficient among soil enzyme in five land utilization modes

酶 Enzyme	脲酶 Urease	过氧化氢酶 Catalase	碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase
过氧化氢酶 Catalase	0.745*		
碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase	0.916**	0.676*	
蔗糖酶 Invertase	0.911**	0.557	0.968**

3 结论与讨论

由本研究结果可知,乔木林地的有机质、CEC、碱解氮、全氮和速效钾含量均高于天然草地、灌木林地、人工草地和农耕地,施肥效应显著。乔木林地提供了大量的凋落物,增加了土壤腐殖质含量,进而提高了各项指标含量。采集的人工草地主要种植紫花苜蓿,但其生长年限仅为 3~5 年,与生长已几十年的天然草地相比,生长期较短,所以作为固氮品种的紫花苜蓿,其土壤碱解氮和全氮含量却低于天然草地。0~20 cm 土层土壤除过氧化氢酶无明显差异外,乔木林地的脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶活性均大于其他 4 种土地利用方式,表明种植乔木林可以使土壤水解酶活性增强,同时也可改善土壤肥力效应。除表层土壤碱性磷酸酶和蔗糖酶外,天然草地土壤脲酶、过氧化氢酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶活性均高于人工草地,可见,天然草地对土壤酶活性的增加有一定效果。试验中土壤酶活性与土壤养分有密切的相关关系,脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶与有机质、碱解氮、全氮和速效钾含量均呈极显著正相关,可以用来表征土壤肥力的高低。

(上接第 102 页)

[参考文献]

[1] 苏莹,王全九,叶海燕,等.微咸水不同入渗水量土壤水盐运移特征研究[J].干旱地区农业研究,2005,23(4):43-48.

[2] 吕殿青,王文焰,王全九.入渗与蒸发条件下土壤水盐运移的研究[J].水土保持研究,1999,6(2):61-66.

[3] 刘广明,杨劲松.地下水作用条件下土壤积盐规律研究[J].土壤学报,2003,40(1):65-69.

[4] Guo H M,Li G H,Zhang D Y,et al. Effects of water table and fertilization management on nitrogen loading to groundwater[J]. Agricultural Water Management,2006,82:86-98.

[5] 刘光栋,吴文良.高产农田土壤硝态氮淋失与地下水污染动态研究[J].中国生态农业学报,2003,11(1):91-93.

[6] 刘宏斌,张云贵,李志宏,等.北京平原农区地下水硝态氮污染状况及其影响因素研究[J].土壤学报,2006,43(3):405-412.

[7] Agus F,Cassel D K. Field-scale bromide transport as affected by tillage[J]. Soil Sci Soc Amer J,1992,56:254-260.

[8] Gish T J,Coffman C B. Solute transport under no-till field corn[J]. Transactions of the ASAE,1987,30:1358-1363.

[9] Comfort S D,Inskeep W P,Lockerman R H. Observed and sim-

[参考文献]

[1] 周礼恺.土壤酶活性的总体在评价土壤肥力水平中的作用[J].土壤学报,1983,20(4):413-417.

[2] 曹慧,杨洁,孙波,等.太湖流域丘陵地区土壤养分的空间变异[J].土壤,2002,34(4):201-205.

[3] 贺明蔡,冷寿慈.桃粮间作对土壤养分状况及土壤生物活性的影响[J].土壤通报,1994,25(4):188-189.

[4] 白文娟,焦菊英.黄土丘陵沟壑区退耕地主要自然恢复植物群落的多样性分析[J].水土保持研究,2006,13(3):140-145.

[5] 刘刚,王志强,王晓岚.吴旗县不同类型土壤干层特征分析[J].水土保持研究,2004,11(1):126-129.

[6] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:上海科学出版社,1978.

[7] 南京大学.土壤农化分析[M].北京:农业出版社,1986.

[8] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986.

[9] 王国梁,刘国斌,许明祥,等.黄土丘陵区纸坊沟流域植被恢复的土壤养分效应[J].水土保持通报,2002,22(1):1-5.

[10] 关松荫,沈桂琴,孟昭鹏,等.我国主要土壤剖面酶活性状况[J].土壤学报,1984,21(4):368-381.

[11] Peruci P,Scarponi L,Businelli M. Enzyme activities in clay loam soil amended with various crop residue[J]. Plant and Soil,1984,81:345-351.

[12] 张鼎华,陈由强.森林土壤酶与土壤肥力[J].林业科技通讯,1987(4):1-3.

ulated transport of a conservative tracer under line-source irrigation[J]. J Environ Qual,1993,22:554-561.

[10] Ashraf M S,Izadi B,King B. Transport of bromide under intermittent and continuous ponding conditions[J]. J Environ Qual,1997,26:69-75.

[11] 曹红霞,康绍忠,何华.灌水频率对地下水埋深较浅土壤中溴和硝态氮迁移的影响[J].农业环境科学学报,2003,22(4):420-424.

[12] Jiang Z,Wu Q J. Water table depth and rainfall timing effect on Br⁻ and NO₃⁻ transport[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering,1997,123:279-284.

[13] Kalita P K,Kanwar R S. Effect of water-table management practices on the transport of nitrate-N to shallow groundwater[J]. Transactions of the ASAE,1993,36:413-422.

[14] Sarwar T,Kanwar R S. NO₃-N and metolachlor concentrations in the soil water as affected by water table depth[J]. Transactions of the ASAE,1996,39:2119-2129.

[15] Bowman R S. Evaluation of some new tracers for soil water studies[J]. Soil Sci Soc Am J,1984,48:987-993.