

绿肥种植对石灰土脲酶活性与土壤肥力的影响

高喜^{1,2}, 曹建华^{1,2}, 程阳², 丁俊峰³, 黄芬², 万珊², 韦群², 何媛媛²

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 国土资源部岩溶动力学重点实验室, 广西桂林 541004; 2. 广西师范大学生命科学学院, 广西桂林 541004; 3. 广西师范大学化工学院, 广西桂林 541004)

摘要 [目的] 探讨绿肥对石灰土的增肥效应。[方法] 取桂林毛村常年种植过紫云英绿肥的冬闲田和自然抛荒农田中的石灰土, 测定石灰土的脲酶活性和土壤肥力。[结果] 绿肥种植大大提高了石灰土 N、P、K 的有效态、全氮含量及脲酶活性, 但对全磷、全钾的增加不明显。石灰土脲酶活性与石灰土氮磷钾全量、碱解氮、速效钾呈显著相关。石灰土脲酶活性呈垂直分布规律, 从耕作层到犁底层下降明显, 从犁底层到底土层下降缓慢。石灰土肥力在垂直方向上呈明显的递减规律。石灰土速效钾对脲酶活性的直接作用有较强的负效应, 但其间接作用使其与脲酶活性在表观上显示正相关关系。[结论] 脲酶活性是表征石灰土肥力水平的重要指标。

关键词 石灰土; 紫云英; 脲酶; 土壤肥力; 通径分析

中图分类号 S158 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2008)31-13725-04

Effect of Planting Green Manure on Urease Activity and Soil Fertility of Lime Soil

GAO Xi et al (Key Laboratory of Karst Dynamics, Ministry of Land and Resources, Karst Geology Institute of Chinese Academy of Geoscience, Guilin, Guangxi 541004)

Abstract [Objective] The study was to explore the improvement effect to soil fertility of planting green manure on soil fertility in lime soil. [Method] The lime soil from the winter fallow field in which Chinese vetch green manure was once planted and the natural barren field in Guilin Village were taken to determine urease activity and soil fertility of the lime soil. [Result] Planting green manure greatly increased the available state of N, P, K, total N content and urease activity in lime soil, but it had no obvious increase on the content of total P and total K. The urease activity of lime soil had significant correlation with total content of N, P, K and alkaline hydrolytic N and available K in lime soil. The urease activity of lime soil showed a vertical distribution law, and it was obviously decreased from plough layer to plowpan, while it was slowly decreased from plowpan to bottom layer. The soil fertility of lime soil showed a obvious decline law in vertical direction. The direct effect of available K on urease activity of lime soil was a strong negative effect, but its indirect effect made it show positive correlation with urease activity in appearance. [Conclusion] Urease activity was an important index which reflected the fertility level of lime soil.

Key words Lime soil; Chinese vetch; Urease; Soil fertility; Path analysis

工业氮肥的使用虽解决了我国庞大人口的粮食问题, 但过量使用会造成氮肥利用率低、石灰土板结、肥力下降, 同时也会使硝酸盐随水渗漏, 造成环境污染问题^[1]。陈文新等提出, 通过扩种豆科植物, 接种根瘤菌, 充分发挥生物固氮作用, 能减少化肥用量, 减低能源压力, 降低环境污染^[2]。紫云英(*Astragalus sinicus* L.) 是豆科黄芪属越年生草本植物, 多在秋季播于晚稻田中, 作早稻的基肥, 是我国稻田最主要的冬季绿肥作物。紫云英有很强的固氮能力, 每年可固定空气中的氮 75~150 kg/hm²^[3], 具有平衡和调节农作物吸收氮、磷、钾及微量元素, 增加作物产量和提高农产品品质的功能; 此外, 还能丰富和平衡土壤中的营养物质, 改良土壤物理性状, 提高土壤酶的活性^[4]。

土壤中大量的生化过程都是在土壤酶的参与下完成的, 它们是土壤中各种生化反应的直接参与者, 是土壤新陈代谢的催化剂^[5-7]。土壤脲酶是一种促氮有机物的水解酶, 是石灰土氮素循环中唯一作用于尿素的土壤酶类, 其酶促反应产物是氨、二氧化碳和水。我国氮肥利用率不足 40%^[8], 与脲酶活性有很大关系。近年来, 国内外学者对石灰土脲酶在农业环境中的作用进行了较全面的研究, 发现其在土壤肥力水平指标^[9-13]、污染程度诊断与监测^[14-17] 等方面有重要的应用价值。但有关岩溶环境下石灰土的脲酶活性特点与石灰土肥力指标相关性的研究较少, 笔者重点分析了石灰土中脲酶及肥力水平的特征, 探讨了绿肥对石灰土的增肥效应。

1 材料与方法

1.1 供试土样 供试石灰土分别取自桂林毛村常年种植过紫云英绿肥的冬闲田和自然的抛荒地, 为泥盆系融县组(D_{3r}) 石灰岩风化形成的石灰土。采用五点混合取样法, 分别在 6 块种有紫云英绿肥的农田(绿肥田) 和 6 块自然抛荒的农田(对照组) 中采集耕作层石灰土样品 6 个, 绿肥田编号为 1、2、3、4、5、6, 对照组编号为 7、8、9、10、11、12。然后在上述 2 种农田中, 分别采集耕作层(0~20 cm), 犁底层(20~40 cm), 底土层(40~60 cm) 石灰土样品各 1 个, 共 6 个, 绿肥田标记为 13、14、15, 对照组标记为 16、17、18。带回实验室测定脲酶活性和石灰土化学性质。

1.2 测定方法 石灰土养分含量测定采用土壤常规分析法。石灰土脲酶活性测定采用靛酚比色法^[18]。

1.3 数据处理 利用 Excel 软件和 SPSS 软件进行通径分析、相关分析。

2 结果与分析

试验所选定的 12 个土样的测定结果见表 1。

2.1 紫云英种植对石灰土理化性质的影响 从表 2 可以看出, 种植紫云英绿肥后, 石灰土 pH 值略微下降, 为原来的 96.7%, 石灰土的肥力指标都有明显地上升。其中紫云英绿肥对脲酶活性影响最大, 脲酶活性是对照组的 374%, 这是因为石灰土脲酶主要来源于石灰土分解尿素的微生物、植物根系以及一些石灰土动物的分泌物。种植绿肥后, 一方面植物本身会释放脲酶, 另一方面会提高石灰土的肥力水平, 带来微生物生长所需的充足的氮源和碳源, 促进了微生物脲酶的分泌。其他肥力指标变化依次为速效磷(180%) > 速效钾(173%) > 碱解氮(157%) > 全氮(148%) > 有机质(127%) > 全磷(120%) > 全钾

基金项目 广西科技厅创新能力建设项目(桂科能 0842008)。

作者简介 高喜(1982-), 男, 河南驻马店人, 硕士, 从事环境生态学方面的研究。

收稿日期 2008-09-16

(118%)。从排列顺序上看,紫云英绿肥大大提高了石灰土中 N、P、K 的有效态,除了全氮外,对全磷、全钾的贡献却较少,表明紫云英作为豆科草本植物有很强的固氮能力,与其共生的根瘤菌能固定空气中的氮,能显著提高石灰土的 N 素含量。在

对 P、K 的贡献上,大大提高了 P、K 的有效态,而对全量增加不明显,表明紫云英能通过其根系分泌有机酸来降低石灰土的 pH 值,造成石灰土的偏酸环境,石灰土环境的酸化有助于活化植物难以吸收利用的 N、P 元素形态。

表1 12个耕作层土样的测定结果

Table 1 The determination results of 12 soil samples in the farming layer

| 样品号 Sample No. | pH 值 pH value | 脲酶活性 NH ₂ -N ng/(g·d) Urease activity | 有机质 g/kg Organic matter | 全氮 g/kg Total N | 全磷 g/kg Total P | 全钾 g/kg Total K | 碱解氮 μg/g Alkaline hydrolytic N | 速效磷 μg/g Available P | 速效钾 μg/g Available K | |
|---------------------------------|-------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| 绿肥田 Green manure field | 1 2 3 4 | 6.8 6.9 7.0 7.1 | 5.8625 2.5750 3.0250 3.4625 | 31.390 30.120 30.190 30.210 | 2.080 1.910 1.940 1.960 | 1.780 1.670 1.690 1.700 | 17.280 17.160 17.190 17.210 | 228 219 221 222 | 9.576 9.541 9.548 9.559 | 66.1 60.4 61.7 61.9 |
| | 5 6 | 6.7 6.8 | 5.7250 4.0000 | 30.320 30.280 | 2.040 1.990 | 1.740 1.720 | 17.250 17.230 | 226 223 | 9.568 9.561 | 64.3 64.0 |
| 对照组 Contrl group | 7 8 9 10 11 12 | 7.0 7.2 7.5 6.8 7.3 6.9 | 1.6625 1.5500 1.1500 0.9125 0.2875 1.0250 | 2.413 2.409 2.402 2.386 2.384 2.391 | 0.140 0.137 0.135 0.130 0.129 0.133 | 0.147 0.146 0.142 0.140 0.137 0.141 | 1.468 1.465 1.461 1.453 1.451 1.456 | 154 145 141 138 135 140 | 5.420 5.410 5.370 5.230 5.190 5.320 | 39.6 38.1 36.3 34.7 33.6 35.8 |

表2 绿肥田和对照组石灰土化学性质的平均值比较

Table 2 Comparison of the mean values of the chemical properties of lime in green manure field and contrl group

| 石灰土样 Lime soil samples | pH 值 pH value | 脲酶活性 NH ₂ -N ng/(g·d) Urease activity | 有机质 g/kg Organic matter | 全氮 g/kg Total N | 全磷 g/kg Total P | 全钾 g/kg Total K | 碱解氮 μg/g Alkaline hydrolytic N | 速效磷 μg/g Available P | 速效钾 μg/g Available K |
|------------------------------|------------------|--|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 绿肥田 Green manure field | 6.88 (96.7) | 4.108 (374) | 30.41 (127) | 1.98 (148) | 1.71 (120) | 17.22 (118) | 223.166 (157) | 9.558 (180) | 63.066 (173) |
| 对照组 Contrl group | 7.11 (100) | 1.097 (100) | 23.97 (100) | 1.34 (100) | 1.42 (100) | 14.59 (100) | 142.166 (100) | 5.323 (100) | 36.350 (100) |

注:括号内的数字为绿肥田与对照组的比值。

Note: The numbers in the bracket are the ratio of that in green manure field to that in contrl group.

2.2 耕作层石灰土脲酶活性与石灰土养分之间的相关性 由表3可知,在所有的石灰土样中,脲酶活性与氮磷钾全量、碱解氮、速效钾等达到显著相关,显著性水平均达到0.95以上,表明石灰土脲酶活性与石灰土有机质和氮磷钾状况有着密切的关系,可将脲酶作为石灰土肥力水平的指标。石灰土脲酶的一个重要的作用是将尿素转化成植物能吸收利用的铵态氮和CO₂,因此,石灰土中的碱解氮和全氮与石灰土脲酶活性有间接的联系,当环境中氮素含量上升时,生物体会

通过自身的代谢调节来适应这种变化。在绿肥田中发现,与酶活相关系数最高的2个因子就是碱解氮和全氮,分别达到了0.981和0.982。在对照组中,与脲酶相关性最大的是全磷(0.987)和速效钾(0.955),这可能是由于在石灰土氮素含量较低时,脲酶活性主要受全磷和速效钾的制约。pH值与脲酶主要呈负相关,有报告指出,石灰土脲酶活性的最适pH值为6.5~7.0。该文pH值测试表明,当前石灰土的pH值正是石灰土脲酶的最适pH值,对照组pH值略高于绿肥组,说明紫

表3 利用SPSS软件计算耕作层脲酶酶活与石灰土化学性质的相关系数

Table 3 The calculated correlation coefficients among urease activity and the chemical properties of lime soil by using SPSS software

| 石灰土样 Lime soil samples | pH 值 pH value | 有机质 Organic matter | 全氮 Total N | 全磷 Total P | 全钾 Total K | 碱解氮 Alkaline hydrolytic N | 速效磷 Available P | 速效钾 Available K |
|---------------------------|------------------|-----------------------|---------------|---------------|---------------|------------------------------|--------------------|--------------------|
| 绿肥田 Green manure field | -0.710 | 0.718 | 0.982 | 0.951 | 0.952 | 0.981 | 0.942 | 0.931 |
| 对照 Contrl group | -0.126 | 0.916 | 0.932 | 0.981 | 0.937 | 0.887 | 0.940 | 0.955 |
| 所有 All | -0.600 | 0.880 | 0.912 | 0.931 | 0.860 | 0.882 | 0.852 | 0.901 |

云英种植后石灰土pH值降低。

2.3 石灰土脲酶活性与石灰土理化性质的途径分析 途径分析是因果机理分析中的数学方法,使各变量在无量纲的基础上,计算途径系数。可用途径系数的大小和正负来表示自变量对因变量作用的大小和方向,且途径系数之间还可进行相互比较^[19]。将2种地上的脲酶活性与理化性质测定结

果用SPSS软件逐步回归,剔除一些没有统计学意义的因子,得到2个标准多元线性回归方程:

$$\text{绿肥田 } U = -291.704 - 2.356 X_1 - 1.748 X_2 + 0.475 X_6 + 24.257 X_7 - 0.324 X_8$$

$$\text{对照组 } U = -53.294 - 0.251 X_1 + 276.564 X_4 + 0.101 X_6 + 5.854 X_7 - 0.789 X_8$$

其中, U 为脲酶活性, X_1 为 pH 值, X_2 为有机质, X_3 为全氮, X_4 为全磷, X_5 为全钾, X_6 为碱解氮, X_7 为速效磷, X_8 为速效钾 ($X_1 \sim X_8$ 均为标准化后的变量)。

设石灰土理化性质各因子 (x_i) 与脲酶酶活 (y) 之间的相关系数为 I_{iy} , 根据通径分析理论, I_{iy} 可分解成直接通径系数 P_{iy} 和间接通径系数 P_{ijy} , 即 I_{iy} 为 x_i 对 y 的总影响力, P_{iy} 为 x_i 对 y 的直接影响力, P_{ijy} 为 x_i 通过 x_j 对 y 的间接影响力。因此, 通过 I_{iy} 、 P_{iy} 和 P_{ijy} 的分析, 可从各因子中找出影响酶活的决定性因子。

直接通径系数反映石灰土各理化性质对脲酶活性直接影响作用的大小。绿肥田石灰土顺序为: 碱解氮 > 速效钾 > pH 值 > 速效磷 > 有机质; 对照组的石灰土为: 速效钾 > 全磷 > 碱解氮 > 速效磷 > pH 值, 表明经绿肥种植后, 脲酶活性的

影响因子发生了较大变化。

从表中4 可看出, 速效钾对脲酶活性的直接通径系数较大, 在绿肥田中达到 - 0.488, 在对照组中达到最大的 - 3.371, 为较强的负效应, 而它通过其他因子对脲酶活性的影响为正效应。通过碱解氮对脲酶活性影响的间接通径系数达到1.058(绿肥田)和1.278(对照组)。pH 值对脲酶活性的直接作用都有较强的负效应。表明石灰土pH 值可能高于石灰土脲酶的最适pH 值, 因此, 随着pH 值的升高, 脲酶活性下降。从表4 的最后一列看出: 除pH 值外, 各种因子通过速效钾对脲酶活性的间接影响均为负效应; 而且, 对照组的这种影响效应要远远高于绿肥田, 两者平均相差10 倍以上。可以认为, 速效钾本身对脲酶活性起抑制作用, 但它能通过影响其他石灰土因子而抵消这种抑制作用, 甚至能起到增强石

表4 石灰土理化性质各因子对脲酶酶活的直接和间接通径系数

Table 4 The direct and indirect path coefficients of each factor of the physical and chemical properties of lime soil to urease activity

| 石灰土因子 (x_i) Lime soil factor | 相关系数 (I_{iy}) Correlation coefficient | 直接通径系数 (P_{iy}) Direct path coefficient | 间接通径系数 (P_{ijy}) Indirect path coefficient | | | | | | |
|--|--|--|--|--------------------------------|------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------|
| | | | X_1 pH 值 pH value | X_2 有机质 Organic matter | X_3 全磷 Total P | X_6 碱解氮 Alkaline hydrolytic N | X_7 速效磷 Available P | X_8 速效钾 Available K | |
| 绿肥田 Green manure field | X_1 | - 0.710 | - 0.254 | - | 0.021 | - | - 0.668 | - 0.129 | 0.321 |
| | X_2 | 0.718 | - 0.057 | 0.092 | - | - | 0.885 | 0.190 | - 0.392 |
| | X_6 | 0.981 | 1.098 | 0.155 | - 0.046 | - | - | 0.245 | - 0.471 |
| | X_7 | 0.942 | 0.252 | 0.130 | - 0.043 | - | 1.068 | - | - 0.465 |
| | X_8 | 0.931 | - 0.488 | 0.167 | - 0.046 | - | 1.058 | 0.240 | - |
| 对照组 Contrl group | X_1 | - 0.126 | - 0.141 | - | - | - 0.129 | - 0.167 | 0.176 | 0.135 |
| | X_4 | 0.981 | 2.010 | 0.009 | - | - | 1.226 | 1.060 | - 3.324 |
| | X_6 | 0.887 | 1.318 | 0.018 | - | 1.870 | - | 0.951 | - 3.270 |
| | X_7 | 0.940 | 1.129 | - 0.022 | - | 1.888 | 1.111 | - | - 3.165 |
| | X_8 | 0.955 | - 3.371 | 0.006 | - | 1.982 | 1.278 | 1.060 | - |

灰土脲酶活性的作用。

在对照组中, 除了速效钾的直接作用外, 全磷的直接通径系数也很大(2.010), 其间接通径系数主要是通过碱解氮、速效磷的正效应(分别为1.226、1.060) 以及通过速效钾的负效应(- 3.021)。

碱解氮无论是直接通径系数还是间接通径系数, 对脲酶活性的影响较大, 且均为正效应(pH 值除外), 而且在绿肥田中的碱解氮对脲酶活性的影响是主要影响。这与上面的相关分析是一致的。

通径分析作为一种因果机理的分析方法, 其直接和间接通径系数之和在数值上等于相关系数, 比相关分析提供了更多的信息, 不仅揭示出脲酶活性与各理化性质关系的密切程度, 而且能很好地指出在这种关系中哪种作用途径处于主导地位。

2.4 脲酶在垂直分布上的活性 由表5 及图1、2 可以看出, 无论是绿肥田还是对照, 其石灰土肥力指标都随着深度的增加而逐渐减少, 其中全氮和速效磷的下降趋势尤为明显, 绿肥田各层的石灰土肥力也要比对照组同层次的高。在图2 中脲酶显示了同样的递减规律, 耕作层与犁底层相差很大,

表5 脲酶活性及石灰土肥力在垂直分布上的特征

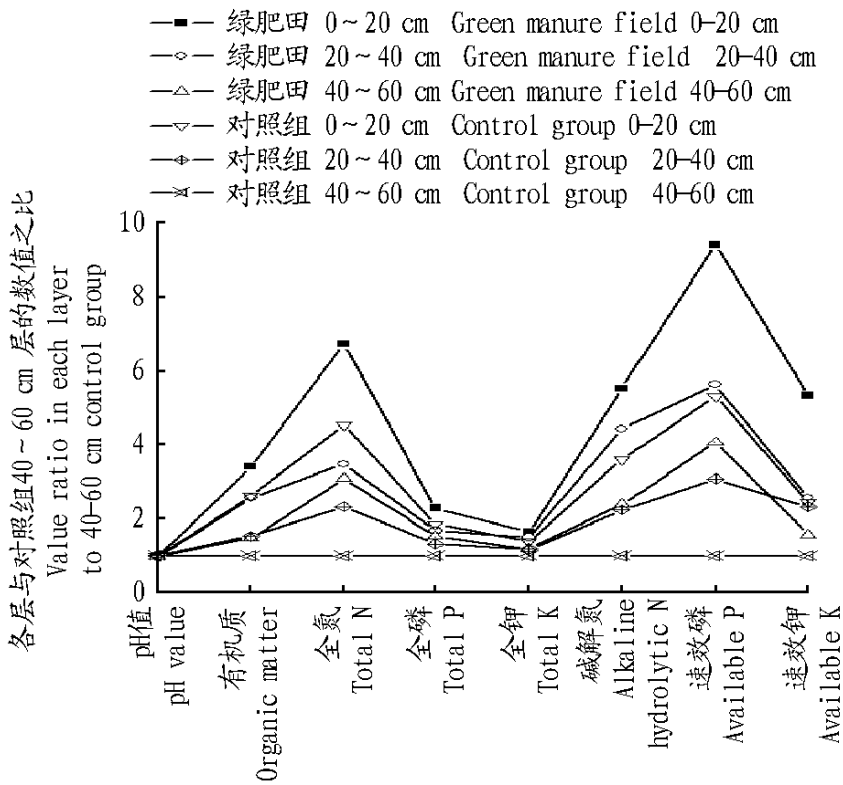
Table 5 The vertical distribution characteristics of urease activity and lime soil fertility

| 土样 Soil samples | 土层 cm Sil layer | pH 值 pH value | 脲酶活性 $\text{NH}_2\text{N}(\text{g} \pm 37, 24 \text{ h})$ Urease activity | 有机质 g/kg Organic matter | 全氮 g/kg Total N | 全磷 g/kg Total P | 全钾 g/kg Total K | 碱解氮 lg/g Alkaline hydrolytic N | 速效磷 lg/g Available P | 速效钾 lg/g Available K |
|------------------------------|-----------------------|---------------------|---|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 绿肥田 Green manure field | 0 ~20 | 7.0 | 5.900 | 3.136 | 0.209 | 0.179 | 1.718 | 227 | 9.549 | 65.8 |
| | 20 ~40 | 6.9 | 1.550 | 2.359 | 0.108 | 0.131 | 1.581 | 182 | 5.726 | 31.6 |
| | 40 ~60 | 6.9 | 1.025 | 1.362 | 0.096 | 0.119 | 1.239 | 98 | 4.132 | 19.3 |
| 对照组 Contrl group | 0 ~20 | 7.0 | 1.575 | 2.406 | 0.141 | 0.145 | 1.458 | 148 | 5.394 | 30.1 |
| | 20 ~40 | 7.2 | 0.162 | 1.410 | 0.072 | 0.103 | 1.236 | 92 | 3.123 | 28.6 |
| | 40 ~60 | 7.1 | 0.075 | 0.917 | 0.031 | 0.078 | 1.049 | 41 | 1.014 | 12.3 |

犁底层与底土层相差相对较小。在绿肥田中, 耕作层脲酶活性远高于犁底层, 相差达58 个单位, 而犁底层和底土层相差只有7 个单位; 在对照中, 石灰土脲酶的下降趋势没有绿肥田

明显, 但耕作层与犁底层也达到9 个单位的差距, 犁底层与底土层相差只有1.17 个单位。表明石灰土脲酶随深度的增加而递减, 紫云英能大大提高石灰土耕作层的脲酶活性, 对犁

底层和底土层的贡献相对较小。



注:设对照组在底层土(40~60cm)时的值为1个单位,其他各层的值与它相比的比值为纵坐标数值。下图同。

Note: Suppose the value in 40-60 cm bottom soil layer in control group is one unit, the ratio of the values in other soils to it are the ordinate values. The same as below.

图1 石灰土各层石灰土肥力在垂直分布上的特征

Fig.1 The vertical distribution characteristics of lime soil fertility in each soil layer

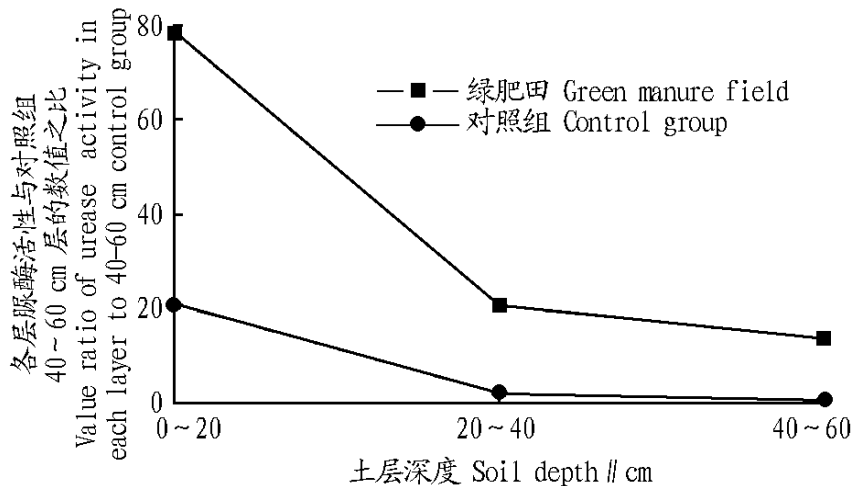


图2 石灰土各层石灰土脲酶活力的大小

Fig.2 Urease activity of lime soil in each layer

3 结论与讨论

紫云英作为一种固氮绿肥大大提高了石灰土N、P、K的有效态和全氮含量,对P、K全量增加不明显。石灰土脲酶活性呈垂直分布规律,从耕作层到犁底层石灰土脲酶活性下降明显,从犁底层到底土层,下降趋势趋于缓和,绿肥种植能显

著增加石灰土脲酶活性。石灰土肥力在垂直方向上呈明显的递减规律,全氮、速效磷、速效钾表现得尤为明显。这一结果与关松荫等在石灰土学报上发表的研究结果一致^[20]。相关分析表明,石灰土脲酶活性与石灰土中氮磷钾全量、有效氮、速效钾均达到了显著的水平,相关系数大于0.95,因此,石灰土中脲酶活性同样是表征石灰土肥力水平的一个重要指标。通径分析表明,石灰土pH值和速效钾对脲酶活性的直接作用都有较强的负效应,但速效钾对脲酶活性的影响主要是具有正效应的间接作用,间接作用不仅抵消了直接作用的负效应,而且使得它与脲酶活性表观上显示出一种显著的正相关关系。

参考文献

- [1] 朱兆良. 合理使用化肥 充分利用有机肥 发展环境友好的施肥体系[J]. 中国科学院院刊, 2003, 18(2): 89-93.
- [2] 陈文新, 陈文峰. 发挥生物固氮作用 减少化学施氮肥用量[J]. 中国农业科技导报, 2004(6): 3-5.
- [3] 王允青, 张祥明, 刘英, 等. 施用紫云英对水稻产量和土壤养分的影响[J]. 安徽农业科学, 2004, 32(4): 699-700.
- [4] 吴萍, 胡南河, 叶爱青, 等. 种植紫云英的效益及其对石灰土肥力的影响[J]. 安徽农业科学, 2006, 34(11): 2466-2468.
- [5] 中国科学院南京石灰土研究所微生物室. 石灰土微生物研究法[M]. 北京: 科学出版社, 1985: 36-46.
- [6] 马健, 王周琼, 李述刚. 小麦根际石灰土酶活性变化研究[J]. 干旱区研究, 1998, 15(2): 60-65.
- [7] 张镜清. 农作物根茬培肥石灰土的作用[J]. 石灰土通报, 1986, 17(3): 138-141.
- [8] 华珞. 石灰土对污染物的缓冲性研究[J]. 农业工程学报, 1992, 8(2): 13-20.
- [9] 周礼恺. 石灰土酶活性的总体在评价石灰土肥力水平中的作用[J]. 石灰土学报, 1983, 20(4): 413-417.
- [10] 郑洪元, 周礼恺, 张德生. 石灰土酶活性[M]. 北京: 科学出版社, 1976.
- [11] 孙波, 赵其国, 张桃林, 等. 土壤质量与持续环境III. 土壤质量评价的生物学指标[J]. 土壤, 1997, 29(5): 225-234.
- [12] 任天志. 持续农业中的石灰土生物指标研究[J]. 中国农业科学, 2000, 33(1): 68-75.
- [13] 沈善敏. 长期石灰土肥力试验的科学价值[J]. 植物营养与肥料学报, 1995, 1(11): 1-9.
- [14] 和文祥, 陈会明, 冯贵预, 等. 汞铬砷元素污染土壤的磷监测研究[J]. 环境科学学报, 2000, 20(3): 338-343.
- [15] WELP G. Inhibitory effects of the total and water-soluble concentrations of nine different metals on the dehydrogenase activity of a tundra soil[J]. Biol Fert Soil, 1999, 30: 132-139.
- [16] MORENO J L, GARCIA C, LANDI B L, et al. The ecological dose value (ED₅₀) for assessing Cd toxicity on ATP content and dehydrogenase and urease activities of soil[J]. Soil Biol Biochem, 2001, 33: 483-489.
- [17] MARGESIN R, ZIMMERBAUER A, SCHINNER F. Monitoring of bioremediation by soil biological activities[J]. Chemosphere, 2000, 40: 339-346.
- [18] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1983.
- [19] 薛薇. 统计分析方法与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004: 326-348.
- [20] 关松荫, 沈桂琴, 孟昭琴, 等. 我国主要土壤剖面酶活性状况[J]. 土壤学报, 1984(4): 368-381.

(上接第13702页)

- [12] 何承刚, 曾旭波. 烤烟香气物质的影响因素及其代谢研究进展[J]. 中国烟草科学, 2005(2): 40-43.
- [13] 胡建军, 周冀衡, 李文伟, 等. 烤烟香味成分与其感官质量的典型相关

- 分析[J]. 烟草科技, 2007(3): 9-15.
- [14] 于建军, 庞天河, 任晓红, 等. 烤烟中性致香物质与评吸结果关系研究[J]. 河南农业大学学报, 2006, 40(4): 346-349.
- [15] DAUS DL, 吴国英. 烟叶中蜡质和类脂物对烟叶品质和香气的关系[J]. 国外烟草, 1991(2): 28.
- [16] 肖协中. 烟草化学[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1997.