

不同磷水平土壤接种丛枝菌根真菌对 植物生长和养分吸收的影响

陈梅梅¹, 陈保冬¹, 王新军¹, 朱永官^{1,*}, 王幼珊²

(1. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 2. 北京市农林科学院植物营养与资源研究所, 北京 100089)

摘要:通过盆栽试验研究了不同磷水平土壤接种丛枝菌根真菌 *Glomus mosseae* 对三叶草 (Clover) 和黑麦草 (Ryegrass) 生长、P 浓度及 N:P 比的影响。试验结果表明, *Glomus mosseae* 显著提高了三叶草中 P 浓度和生物量, 降低了植株 N:P 比, 对黑麦草植株 P 含量、生物量及 N:P 比没有显著影响; 在不同磷水平土壤中, 接种处理对单种时三叶草中 P 含量的影响程度不同, 以中磷和高磷水平下的影响较显著, 这表明 *Glomus mosseae* 对三叶草的菌根效应在不同磷水平下并不相同; 另外, 两种植物混合种植情况下, 黑麦草的竞争能力高于三叶草, 使得其 P 浓度和生物量都显著高于三叶草, 而接种 *Glomus mosseae* 增加了混种中三叶草的生物量和 P 浓度, 降低了黑麦草的生物量, 表明 *Glomus mosseae* 能提高混种中三叶草的竞争能力, 从而改变群落中物种的竞争关系。此外, 在一定磷水平下, 菌根真菌的存在降低了三叶草中 N:P 比, 这会改变三叶草的受限制方式, 由受 P 元素限制变为受 N 元素限制。

关键词:丛枝菌根真菌 *Glomus mosseae*; 磷; 三叶草; 黑麦草; N:P 比

文章编号: 1000-0933 (2009) 04-1980-07 中图分类号: Q948 文献标识码: A

Influences of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on the growth and ecological stoichiometry of clover and ryegrass grown in monoculture or in mixture at different phosphorus (P) levels

CHEN Mei-Mei¹, CHEN Bao-Dong¹, WANG Xin-Jun¹, ZHU Yong-Guan^{1,*}, WANG You-Shan²

¹ Research Center for Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

² Institute of Plant Nutrition & Resources, Beijing Academy of Agriculture & Forestry, Beijing 100089, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(4): 1980 ~ 1986.

Abstract: A pot experiment was conducted to investigate the effects of AMF on the growth, P concentrations and N:P ratios of clover and ryegrass grown in monoculture or in mixture at different P levels. The results showed that: (1) the inoculation with *Glomus mosseae* significantly increased dry mass and P concentration, decrease N:P ratio of clover, while had no significant influences on those of ryegrass; (2) at different P levels, AMF had a more significant influence on P concentration of clover grown singly in soil with medium or high P than that in soil with low P, suggesting that *Glomus mosseae* had a different effect on P concentration of clover at different P levels; (3) ryegrass showed competitive advantages against clover in mixture, thus, ryegrass in mixture had a higher P concentration and dry mass than clover, however, the inoculation with *Glomus mosseae* enhanced dry mass and P concentration of clover, while decreased dry mass of ryegrass in mixture culture, which indicated that root colonization can improve the competitiveness of clover in mixture, and affected plant community structure. In addition, the colonization of *Glomus mosseae* also reduced N:P ratio of clover, this can lead to the shift in limitation from P to N nutrient.

基金项目:国家自然科学基金委创新群体资助项目 (40621061); 国家重点基础研究发展计划资助项目 (2005CB121105)

收稿日期: 2007-12-06; 修订日期: 2008-04-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ygzhu@rcees.ac.cn

Key Words: *Glomus mosseae*; phosphorus (P); clover; ryegrass; N:P ratio

生态化学计量学是指生态过程和生态相互作用中多种化学元素和能量平衡的科学,它主要研究 C、N、P 3 种元素之间的关系。生态化学计量学理论已经广泛应用于营养动态^[1,2]、消费者驱动的养分循环^[3,4],生物的营养限制^[5-7]等研究。在生态学研究,植物体中的 N:P 比可作为判断植物生长的养分供应状况的指标^[6,8-10],如判断植物是受 N 限制还是受 P 限制^[5,9]。Wassen 等^[8]和 Koerselman^[5]等通过对湿地植被的研究,发现当 N:P > 16 时,这个系统是受 P 限制的,而当 N:P < 14 时,这个系统是受 N 限制的。Brankhekke 和 Hooftman^[11]通过对草地的试验研究认为,当 N:P > 14 时,这个系统是受 P 限制,而当 N:P < 10 时,这个系统被认为是受 N 限制。在植物水平上,短期肥力实验表明,当 N:P < 10 时,植物生物量受 N 限制,当 N:P > 20 时,植物生物量受 P 限制^[9]。N:P 的变化会影响生态系统中群落组成,最终影响生态系统过程。

菌根是陆地生态系统最重要的共生体之一,它在调控生态系统中养分和能量循环方面都起着重要作用。大量文献报道表明丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizae fungi, AMF)能够改善植物的磷营养状况^[12-14],但它不能自养,需要植物提供碳水化合物以维持生长和繁殖,由于它们之间的 C 和 P 相互交换,从而使得这一共生体系具有较强的计量学关系。目前,从生态化学计量学角度探讨菌根真菌和植物间相互作用的研究较少,因此,本实验采用温室盆栽试验的方法,在 3 种不同磷水平土壤中以白三叶草和多年生黑麦草为宿主植物,从生态化学计量学角度研究了菌根真菌对植物生长和养分吸收的影响,对应用菌根技术提高黄土高原土壤养分利用率和植被恢复效果具有一定意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 供试基质

供试土壤采自甘肃省定西市黄土高原丘陵区(35°57'N, 104°57'W)的 3 种不同磷水平土壤:油松地低磷土,柠条地中磷土,农地高磷土。供试土壤均风干过 2 mm 筛,并于北京大学第三附属医院辐射灭菌(20 kGy)后待用。土壤基本化学性质如表 1 所示。

表 1 不同磷水平土壤的基本化学性质
Table 1 The chemical property of different soils

磷水平 P levels	有机质浓度 (g kg ⁻¹) O. M.	铵态氮 (mg kg ⁻¹) NH ₄ ⁺	硝态氮 (mg kg ⁻¹) NO ₃ ⁻	有效磷 (mg kg ⁻¹) Available P	总磷 (mg kg ⁻¹) Total P
低磷 LP	7.4	7.7	2.1	1.9	549.3
中磷 MP	31.3	20.4	20.6	4.9	600.9
高磷 HP	10.4	8.7	10.6	12.2	715.1

1.1.2 供试植物

供试宿主植物为白三叶草(*Trifolium repens* Linn.)和多年生黑麦草(*Lolium perenne* L.)。挑选大小一致且籽粒饱满的种子,用 10% H₂O₂对种子进行表面消毒 10 min,蒸馏水冲洗多次后于恒温培养箱 25℃ 催芽,出芽后播种,试验采用白色塑料花盆(180mm × 160mm),每盆装土 1 kg。

1.1.3 供试菌种

Glomus mosseae(BGCXJ03A),由北京市农林科学研究院植物营养与资源研究所提供。试验所用接种剂分离自新疆阿克苏水稻根际,用高粱扩繁。接种物含有真菌孢子、菌丝、侵染根段等繁殖体及混合基质。每盆层接 30 g,不接种处理加入等量的灭菌菌剂。

1.2 实验设计

在 3 种不同 P 水平土壤中,分别接种(AM)或不接种(NM)菌根真菌 *Glomus mosseae*,单独种植或混合种植上述两种植物。混合种植处理两种植物减半,均匀播于同一盆中。植物生长期间称重法保持土壤重量含水

量为 15%。试验共 18 个处理,每个处理设 4 个重复。

1.3 收获与分析测定

植物生长 8 周后,将植株地上、地下部分分别收获,用自来水和去离子水冲洗干净,根样剪成 1 cm 根段,取出部分根样用曲利苯蓝-方格交叉法测定根系的菌根侵染率^[15,16],剩余的根系和地上部分于 70℃、48 h 烘干,称取重量,粉碎后待用。

植物地上部分用浓硫酸-过氧化氢消煮后,用凯式定氮仪测定总氮,用电感耦合等离子发射光谱仪(ICP-OES, Optima 2000DV, Perkin Elmer Co. USA)测定磷浓度,消煮的同时加入国家标准局提供的标准物质(灌木枝叶, GBW07603, GSV-2)以保证消煮和分析过程中的准确性和精确性^[17]。

1.4 数据分析

所有试验数据用 Microsoft Excel 进行均值和标准差计算并作图,用 SPSS 统计分析软件(SPSS 11.5)对数据进行多因素方差分析,检验处理效应显著性。

2 结果与分析

2.1 菌根侵染率

试验结果表明(表 2),未接种处理没有观察到菌根真菌侵染的迹象。三叶草接种 *Glomus mosseae* 均可以检测到较高的菌根侵染,且都显著高于黑麦草的菌根侵染率($P < 0.001$)。对于黑麦草而言,不同 P 水平菌根真菌的侵染能力不同,大小依次为:LP > MP > HP,这表明土壤 P 水平的高低会影响 *Glomus mosseae* 对黑麦草的侵染。与单种相比,混种降低了三叶草接种 *Glomus mosseae* 的菌根侵染率。

2.2 植物生长

接种处理对不同植物生长的影响不同(表 3)。接种处理显著提高了单种三叶草地上部分和根系干重($P < 0.001$),但对黑麦草的生长影响不显著,甚至抑制其生长;同时,接种处理也增加了混种中三叶草地上部分和地下部分干重,而降低了黑麦草的干重。与单种相比,混种显著降低了三叶草地上部和地下部干重,而对黑麦草地上部的影响正好相反。

2.3 植物 N 浓度

不同 P 水平土壤对植物 N 浓度影响不同,其 N 浓度的高低依次为:LP > MP > HP(图 1)。对于 LP 和 MP 两个水平,三叶草中 N 浓度均高于黑麦草中 N 浓度(图 1a, 图 1b)。接种处理均降低了三叶草中 N 浓度,尤其在 MP 和 HP 两个水平下的影响最为显著(图 1b, 图 1c),而对黑麦草中 N 浓度没有显著影响。此外,与单种相比,混种降低了三叶草中 N 浓度,而对黑麦草中 N 浓度影响不显著。

2.4 植物 P 浓度

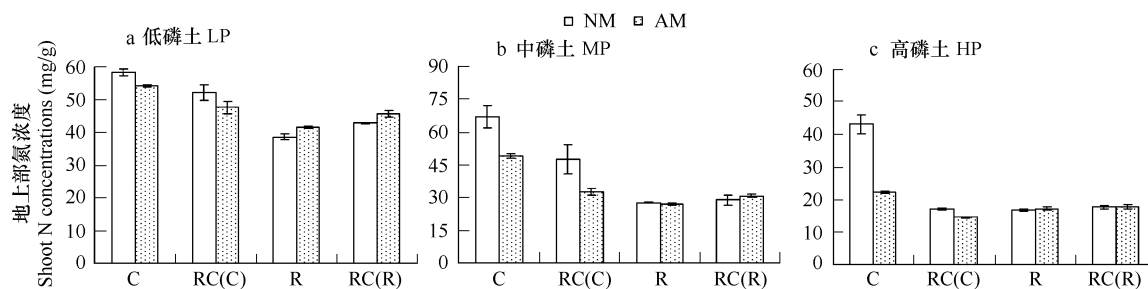
对于 MP 和 HP 两个水平,未接种处理三叶草中 P 浓度均低于黑麦草中 P 浓度(图 2b, 图 2c)。不管是单种还是混种,接种处理均提高了三叶草中 P 浓度(图 2),尤其在 MP 和 HP 两个水平下影响最大;而对黑麦草中 P 浓度的影响不显著。与单种相比,混种降低了三叶草中 P 浓度。

表 2 不同磷水平对三叶草和黑麦草接种 *Glomus mosseae* 的菌根侵染率的影响

Table 2 Root colonization of clover and ryegrass at different P levels

磷水平 P levels	植物 Plant (Pt)	侵染率(%) Colonization rate	
		不接种 NM Non-inoculation	接种 AM Inoculation
低磷 LP	C	0.0	70.2 (±4.1)
	R	0.0	51.2 (±2.8)
	RC(C)	0.0	65.2 (±3.3)
	RC(R)	0.0	34.6 (±2.8)
中磷 MP	C	0.0	74.6 (±3.9)
	R	0.0	12.2 (±1.5)
	RC(C)	0.0	35.6 (±5.7)
	RC(R)	0.0	16.0 (±2.7)
高磷 HP	C	0.0	70.2 (±3.5)
	R	0.0	4.9 (±0.6)
	RC(C)	0.0	59.1 (±3.3)
	RC(R)	0.0	2.4 (±0.2)
显著性 Significance			
菌根 M			***
磷 P			***
植物 Pt			***
M P			***
M Pt			***
P Pt			***
M P Pt			***

Average ± SE, $n=4$; C:白三叶草 clover; R:黑麦草 ryegrass; RC(C):混种白三叶草 clover in mixture; RC(R):混种黑麦草 ryegrass in mixture; *** 表示在 $P < 0.001$ 水平差异显著

图1 不同磷水平土壤接种 *Glomus mosseae* 对三叶草和黑麦草中氮含量的影响Fig. 1 The effects of inoculation with *Glomus mosseae* on N concentrations of clover and ryegrass at different P levels

C:白三叶草 clover; R:黑麦草 ryegrass; RC(C):混种白三叶草 clover in mixture; RC(R):混种黑麦草 ryegrass in mixture

表3 不同磷水平接种 *Glomus mosseae* 对三叶草和黑麦草干重的影响Table 3 The effects of inoculation with *Glomus mosseae* on dry mass of clover and ryegrass at different P levels

磷水平 P levels	植物 Plant (Pt)	不接种 NM Non-inoculation		接种 AM Inoculation	
		地上部 (mg plant ⁻¹) Shoot biomass	根系 (mg plant ⁻¹) Root biomass	地上部 (mg plant ⁻¹) Shoot biomass	根系 (mg plant ⁻¹) Root biomass
低磷 LP	C	4.66 ± 0.08	3.61 ± 0.24	27.19 ± 2.71	71.76 ± 12.73
	R	66.35 ± 3.41	50.59 ± 2.65	55.16 ± 3.04	19.70 ± 2.43
	RC(C)	3.58 ± 0.12	3.02 ± 0.86	16.88 ± 2.76	3.95 ± 0.34
	RC(R)	75.99 ± 10.25	25.37 ± 0.81	68.12 ± 8.04	14.34 ± 2.72
中磷 MP	C	4.78 ± 0.26	3.31 ± 0.55	63.59 ± 8.03	34.42 ± 3.54
	R	219.38 ± 5.80	100.82 ± 5.55	211.41 ± 8.88	103.06 ± 7.31
	RC(C)	3.34 ± 0.30	1.32 ± 0.17	16.36 ± 0.52	4.21 ± 0.50
	RC(R)	412.50 ± 16.82	80.78 ± 10.87	388.75 ± 5.61	84.64 ± 6.79
高磷 HP	C	16.81 ± 0.76	10.73 ± 0.53	168.91 ± 2.97	87.64 ± 4.78
	R	257.66 ± 6.47	169.03 ± 4.74	251.56 ± 3.27	149.84 ± 2.94
	RC(C)	13.80 ± 0.76	3.22 ± 0.07	59.80 ± 6.94	13.56 ± 1.98
	RC(R)	622.70 ± 12.11	147.70 ± 2.88	584.20 ± 25.28	151.70 ± 4.85
显著性 Significance		地上部 Shoot biomass		根部 Root biomass	
菌根 M		***		***	
磷 P		***		***	
植物 Pt		***		***	
M P		***		***	
M Pt		***		***	
P Pt		***		***	
M P Pt		***		***	

average ± SE, n = 4; C:白三叶草 clover; R:黑麦草 ryegrass; RC(C):混种白三叶草 clover in mixture; RC(R):混种黑麦草 ryegrass in mixture; ***表示在 $P < 0.001$ 水平差异显著

2.5 植物中 N:P 比

对于 MP 和 HP 两种水平,未接种处理三叶草中 N:P 比均高于黑麦草中 N:P 比(图 3b, 图 3c)。接种 *Glomus mosseae* 降低了三叶草中 N:P 比,使得三叶草中的 N:P 比与黑麦草中的 N:P 比相当,然而对黑麦草中的 N:P 比影响不显著(图 3)。

统计分析结果表明,植物中 N 浓度在不同处理之间差异极显著(表 4),而菌根真菌和 P 水平二者相互作用对植物中 P 浓度和 N:P 比没有显著影响,除此之外,菌根真菌, P 水平和植物处理三者相互作用之间对 N:P 也没显著影响,其它处理间差异显著。

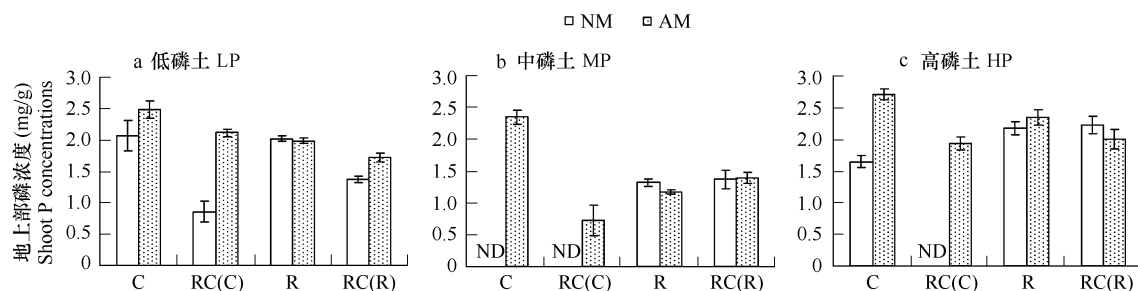


图2 不同磷水平土壤接种 *Glomus mosseae* 对三叶草和黑麦草中磷含量的影响

Fig. 2 The effects of inoculation with *Glomus mosseae* on P concentrations of clover and ryegrass at different P levels

C:白三叶草 clover; R:黑麦草 ryegrass; RC(C):混种白三叶草 clover in mixture; RC(R):混种黑麦草 ryegrass in mixture; ND:未测出 no data

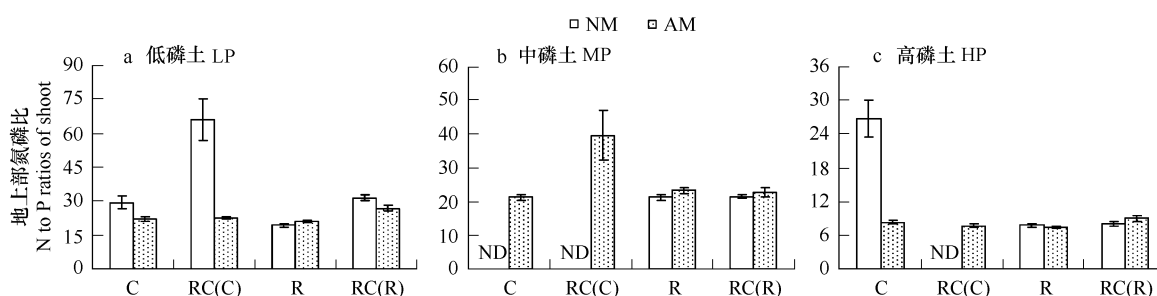


图3 不同磷水平土壤接种 *Glomus mosseae* 对三叶草和黑麦草中氮磷比的影响

Fig. 3 The effects of inoculation with *Glomus mosseae* on N:P ratios of clover and ryegrass at different phosphorus levels

C:白三叶草 clover; R:黑麦草 ryegrass; RC(C):混种白三叶草 clover in mixture; RC(R):混种黑麦草 ryegrass in mixture; ND:未测出 no data

3 讨论

在陆地生态系统中,80%以上的高等植物都能与菌根真菌形成共生体,菌根真菌可以通过在土壤中形成庞大的菌丝网络来增加植物根系的吸收面积,从而增加根系对营养元素的吸收并且促进植物生长^[18],但是菌根真菌的生长及其对植物吸收养分的影响又受到多种因素的影响,如土壤养分,尤其是磷素营养以及宿主植物种类等^[12,19]。Chen等^[20]研究发现,土壤中P含量过高会抑制菌根真菌的发育,降低菌根真菌对植物根系的侵染;同时,植物根毛的多少及形态也会影响P的吸收和菌根发育,如根毛多而长的植物不易被菌根真菌侵染,而无根毛或根毛少而短的植物易受菌根真菌侵染。

由于菌根真菌具有生态专性共生特点,不同植物的形态和特性也不同,所以同一个菌株侵染不同宿主植物的能力并不相同。本试验结果表明,对于不同P水平土壤,菌根真菌对三叶草的根系侵染影响不大,这表明尽管不同土壤P水平间存在一定的差异,然而不同土壤其它养分及性质的差异也可能影响菌根真菌对三叶草的侵染;对于同一种土壤,菌根真菌对三叶草的根系侵染率高于黑麦草的侵染率,与三叶草的不发达根系,对菌根真菌的依赖性强有关。不同P水平土壤对接种三叶草中P浓度影响较大,这说明菌根真菌对于植物中P浓度所起的作用不能单纯依靠侵染率的变化来判断。接种菌根真菌明显促进了三叶草的生长,这主要是通过菌根改善了植物中的P营养得以实现,而菌根真菌对黑麦草的生长和元素吸收没显著影响,与黑麦草的庞大

表4 不同试验处理之间的差异显著性分析

Table 4 Significance of differences between different treatments was shown

项目 Item	N (mg g ⁻¹)	P (mg g ⁻¹)	N:P 比
菌根 M	***	***	***
磷水平 Ps	***	***	***
植物 Pt	***	***	***
M × Ps	***	NS	NS
M × Pt	***	***	***
Ps × Pt	***	***	***
M × Ps × Pt	**	*	NS

***: $P < 0.001$; **: $P < 0.01$; NS: not significant

根系,根毛形态及对菌根真菌的依赖性低有关。未接种处理混种中的黑麦草根系发达,对养分和水分的竞争能力强,从而抑制了三叶草的生长,而接种处理促进了混种中三叶草的生长,改善了其 P 营养,能够增强三叶草在混种中的竞争能力,从而改变群落中物种的竞争关系,进而影响群落结构和组成。对于黄土高原丘陵区养分贫瘠,植物多样性低这一状况,菌根共生体的存在以及种植豆科植物对提高土壤肥力及改善群落结构无疑具有重要意义。

植物生物量中 N:P 比的变化可以用来判断植物是受 N 限制还是受 P 限制。无论单种还是混种,未接种处理三叶草中的 N:P 比均显著高于黑麦草中的 N:P 比,表明这两种植物对 N 和 P 元素的吸收能力不同,生长受限制方式也不同,因此,当 N 或 P 养分不足并成为限制植物生长的主要因素时,由于黑麦草的须根发达,对养分竞争能力强,混种中三叶草和黑麦草之间属于竞争关系。接种处理降低了三叶草中 N 浓度,这可能是由于接种真菌后生物量增加的稀释效应所致。无论接种与否,不同 P 水平土壤对三叶草中 N:P 比变化的影响不同,尤以 HP 的影响最大,对于 HP 水平土壤,接种菌根真菌使三叶草中 N:P 比从 30 降低到 10 左右,这一比例的变化可能会使三叶草由受 P 元素限制变为受 N 元素限制。此外,接种处理混种三叶草中 N:P 比大小与黑麦草中 N:P 比基本一致,这说明接种菌根真菌后,混种中的三叶草和黑麦草受共同因素限制,这也可能是接种菌根真菌后植物之间由竞争关系变为共存关系的原因所在。

本试验初步从生态化学计量学角度研究了接种菌根真菌对植物生长和养分吸收的影响,结果表明接种菌根真菌能够促进三叶草对养分的吸收,改变植物群体结构,这对于提高黄土高原养分利用和植物多样性有重要意义;同时,菌根真菌的侵染能改变三叶草中 N:P 比,这可以作为预测养分限制的依据,然而,对于不同土壤,N:P 比的临界值不尽相同,因此,亟需进一步的试验确认不同生态系统中 N:P 比的临界值,以便能更准确预测养分限制,从而为有效利用养分提供一定的依据和参考。

References:

- [1] Sterner R W, Hessen D O. Algal nutrient limitation and the nutrition of aquatic herbivore. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1994,25: 1—29.
- [2] Andersen T. *Pelagic Nutrient Cycles; Herbivores as Sources and Sinks*. Berlin: Springer-Verlag, 1997.
- [3] Sterner R W. The ratio of nitrogen to phosphorus resupplied by herbivores: zooplankton and the algal competitive arena. *American Naturalist*, 1990,136:209—229.
- [4] Elser J J, Urabe J. The stoichiometry of consumer-driven nutrient recycling: theory, observations, and consequences. *Ecology*, 1999,80:735—751.
- [5] Koerselman W, Meuleman A F W. The vegetation N:P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation. *Journal of Applied Ecology*, 1996,33:1441—1450.
- [6] Aerts R, Chapin F S III. The mineral nutrient of wild plants revisited: a re-evaluation of processes and patterns. *Advances in Ecological Research*, 2000,30:1—67.
- [7] Tessier J T, Raynal D J. Use of nitrogen to phosphorus ratios in plant tissue as an indicator of nutrient limitation and nitrogen saturation. *Journal of Applied Ecology*, 2003,40:523—534.
- [8] Wassen M J, Olde Venterink H G M, de Swart E O A M. Nutrient concentrations in mire vegetation as a measure of nutrient limitation in mire ecosystems. *Journal of Vegetation Science*, 1995,6:5—16.
- [9] Güsewell S. N:P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance. *New Phytologist*, 2004,164:243—266.
- [10] Zeng D H, Chen G S. Ecological stoichiometry: A science to explore the complexity of living systems. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005,29(6): 1007—1019.
- [11] Brankhekke W G, Hooftman D A P. The resources balance hypothesis of plant species diversity in grassland. *Journal of Vegetation Science*, 1999, 10:187—200.
- [12] Feng H Y, Feng G, Wang J G, *et al.* Regulation of P status in host plant on alkaline phosphatase (ALP) activity in intraradical hyphae and development of extraradical hyphae of AM fungi. *Mycosystema*, 2003,22(4):589—598.
- [13] Song Y C, Li X L, Feng G. The effect of VAM fungi on phosphatase activity in maize rhizosphere. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001,12 (4):593—596.

- [14] Liu J L, Zhang F S. The transformation of phosphorus in the rhizosphere of crops and effect of VA to phosphorus transformation. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 1999, 22 (4) :4—9.
- [15] Phillips J M, Hayman D S. Improved procedures for clearing and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Trans. Br. Mycol. Soc.*, 1970, 55:158—161.
- [16] Giovannetti M, Mosse B. Evaluation of techniques for measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infection in roots. *New Phytologist*, 1980, 84:489—500.
- [17] Lu R K. *Analytical methods for soils and agricultural chemistry*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [18] Smith S E, Read D J. *Mycorrhizal symbiosis*. London, England: Academic Press, 1997.
- [19] He X L, Li B. Selection research of VA mycorrhizal fungus and plant. *Acta Bot Boreal. Occident Sin.*, 1999, 19(3) :471—475.
- [20] Chen B D, Roos P, Borggaard O K, *et al.* Mycorrhiza and root hairs in barley enhance acquisition of phosphorus and uranium from phosphate rock but mycorrhiza decreases root to shoot uranium transfer. *New Phytologist*, 2005, 165:591—598.

参考文献:

- [10] 曾德慧, 陈广生. 生态化学计量学: 复杂生命系统奥秘的探索. *植物生态学报*, 2005, 29(6) :1007~1019.
- [12] 冯海燕, 冯固, 王敬国, 等. 植物磷营养状况对丛枝菌根真菌生长及代谢活性的调控. *菌物系统*, 2003, 22(4) :589~598.
- [13] 宋勇春, 李晓林, 冯固. 泡囊丛枝(VA)菌根对玉米根际磷酸酶活性的影响. *应用生态学报*, 2001, 12(4) :593~596.
- [14] 刘建玲, 张福锁. 小麦、玉米根际磷转化及VA菌根对其影响研究. *河北农业大学学报*, 1999, 22(4) :4~9.
- [17] 鲁如坤. *土壤农业化学分析方法*. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [19] 贺学礼, 李斌. VA菌根真菌与植物间相互选择性研究. *西北植物学报*, 1999, 19(3) :471~475.