

水肥耦合效应研究^①

I. 不同降雨年型对 N、P、水配合效应的影响

金軻 汪德水 蔡典雄 周涌 郭世昌 黄峰 王翠玲

(中国农业科学院土壤肥料研究所, 北京 100081) (河南洛阳农业科学研究所, 洛阳 471000)

摘要 本文通过统计分析洛阳地区近 30 年的降雨量, 模拟洛阳地区 3 种不同的降雨年型, 利用防雨旱棚研究旱地农田 N、P、水的耦合作用及其对小麦产量影响。研究结果表明: 在欠水年土壤水分很低的情况下, 通过协调土壤中水分和养分, 也会产生激励作用, 获得较为理想的产量; 各因素间的交互作用是可以人为调控措施进行转变的。在正常年份和丰水年, N_1 和水为顺序加和作用类型; 而 N_2 、 N_3 和水为协同作用类型。P 的增产效应相对较低; N 的增产效应和土壤水分紧密联系; P 肥的增产效应的大小顺序为: 欠水年>平水年>丰水年。

关键词 N P 水 耦合效应 降雨年型

在早期的研究中, 人们对水分和产量, 或肥料与产量之间的相互关系进行了很多研究, 得出了不少正确的结论。毫无疑问, 在水分不足的情况下, 补充水分能增加产量; 肥力低的土壤, 施肥无疑有增产作用。近几年来, 我国开展配方施肥的研究, 得到很多施肥效益方程, 但在推广过程中出现很多不同的结果。究其原因是没有把水分和养分结合起来, 特别是旱地水分和养分间有更为复杂的关系^[1]。本文通过模拟洛阳地区不同的降雨年型, 系统的分析了不同年型下, 洛阳地区 N、P、水的耦合效应, 旨在为提高水分、养分的利用率和利用效率提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验设在半湿润偏旱区河南省洛阳农科所旱棚, 本区多年平均降水为 604.1mm 左右(表 1), 地下水位为 4~5m。供试土壤为潮褐土, 母质为洪积沉积物, 耕层为中壤, 心土层有粘化层。耕层土壤容重为 1.31Mg/m³, 田间持水量为 25.7%, 饱和持水量为 43.1%, 干燥度 1.34。耕层有机质含量为 1.44%,

表 1 洛阳地区月平均降雨量 (1965~1996)

Table 1 The amount of average monthly precipitation in Luoyang

	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
月平均值	7.7	13.4	26.9	38.5	51.7	66.1	136.8	103.3	78.2	44.4	27.0	10.1
标准差 SD	8.98	13.68	17.80	27.61	43.76	57.68	69.62	63.54	57.06	33.3	26.00	11.99

① “九五”国家旱农攻关项目部分研究内容
收稿日期: 1998-06-16

全 N 0.12%，全 P 0.15%，碱解 N 94.9mg/kg，速效 P 14.16mg/kg，pH 8.3。由于 7~9 月降雨较多，播种时土壤含水量为 20%。

不同水分、肥料处理的微区试验置于高 5m、宽 3m，分三节可移动，每节长 10m，四面防雨的旱棚内。试验于 1997 年 10 月份开始，N、P、水各设 3 个处理（表 2），采用完全区组设计，3 次重复，小区面积为 2.0m²，每小区耕层土壤均来自混匀后的同一土壤。小区 2m 土体四周均以塑料（4 层）相隔，以防水分侧渗，播种后模拟洛阳地区多年旬降雨量设计定期进行人工浇水，水量称重，用喷壶均匀撒入小区。雨雪天将旱棚置于试验区之上，以防天然降雨^[2]。

供试作物为豫麦 48，播量 135kg/hm²，播种前土壤含水量为 20%，田间管理与大田一致。补充灌溉时间见表 3。

表 2 N、P、水水平设计
Table 2 The design of N, P and water

项 目 Item	处理 Treatment		
	1	2	3
N (kg/hm ²)	60	120	180
P ₂ O ₅ (kg/hm ²)	60	120	180
年灌水量 The amount of water per year (mm)	300	600	900

表 3 补充灌水时间表¹⁾ (mm)
Table 3 The schedule of irrigation

月 份 month	上旬 First ten days			中旬 Middle ten days			下旬 Last ten days		
	-2	0	2	-2	0	2	-2	0	2
10	0.00	31.12	47.16	0.00	33.78	55.8	0.0	17.06	31.1
11	0.00	23.46	35.62	0.00	20.08	32.04	0.00	20.08	32.66
12	29.7	16.54	22.00	48.78	17.96	22.8	56.00	18.32	22.86
1	0.00	16.54	23.96	26.92	12.44	16.26	25.90	11.74	15.3
2	45.56	14.04	17.36	30.24	18.14	24.28	12.00	14.58	20.32
3	22.66	17.06	23.22	0.00	16.36	25.08	0.00	22.04	33.14
4	0.00	19.92	29.26	0.00	20.26	32.7	0.00	31.64	47.2
5	23.86	24.88	34.46	0.00	27.56	44.54	0.00	43.38	67.22
6	0.00	38.76	72.38	0.00	26.06	38.44	0.00	61.68	90.4
7	178.48	88.88	117.02	0.00	67.92	103.66	0.00	86.58	128.46
8	0.00	75.9	115.08	42.20	62.22	87.3	3.10	43.2	62.32
9	54.68	61.16	84.94	0.00	35.74	61.32	0.00	43.92	82.34
合计 Total	355.0	428.6	622.48	148.14	357.52	544.2	97	414.22	633.32

1)全年各水平总用水量: -2: 300mm, 0: 600mm, 2: 900, 小区面积 2m²。
Note: The total amount of irrigation: -2: 300mm, 0: 600mm, 2: 900mm, The area of plot 2m².

2 结果与讨论

2.1 欠水年年型下 N、P、水的交互作用

以欠水年不施 N、P 的处理作为对照，计算各处理的相对产量和增产效应（表 4）。

由表 4 可以看出, N_1P_1 、 N_1P_2 、 N_2P_1 为顺序加和 (sequentially additive) 交互作用类型, 在这种交互作用类型情况下, 相对产量和 SA 的比例为 1 或接近于 1, 表明它们的数值大小是相等的。N、P 为米切里希 (Mitscherlich type) 限制因素, 其所对应的点都应该处于 MFYP 的 C 区域^[3-5]。在 SA 交互类型的情况下, 单因素的增产效应无论是单独施用还是和其他肥料一起施用, 其大小是相等的。

N_1P_3 为协同作用 (synergistic) 交互类型, 在这种情况下, N、P 一起施用时的增产效应要大于 N、P 单独施用时的增产效应的乘积。因此, N、P 一起施用时的增产效应要大于单独施用的增产效应。在这种情况下, N、P 为李比希 (Liebig) 限制因素, 也就是说, 要使一个因素或者额外投入产生较大的增产效应, 就必须克服另一个元素的限制作用。由此可见, 即使是欠水年土壤水分很低的情况下, 通过协调土壤中水分和养分, 也会产生激励效应, 获得较为理想的产量。这是因为施肥提高了作物吸收、转运、利用土壤水分的能力, 使原来对作物生长“无效”的深层水分得到活化, 达到“以肥调水”的效果。

N_2P_2 、 N_2P_3 、 N_3P_2 、 N_3P_3 为颉颃作用 (antagonistic) 交互作用类型, N、P 一起使用时的增产效应小于 N、P 单独施用时增产效应的乘积。在这种情况下, N、P 的增产效应均很低, 表明 N、P 的配比处于一种不协调的状态, 也可能是存在着另一种限制因素。根据李比希最小定律, 由于这种限制因素的存在, 限制了 N、P 的激励作用。在干

表 5 欠水年 N、P、水交互效应分析

Table 5 Relative yields and interaction for NP in year with low water

处理 treat	相对产量 Relative yield	顺序 加和 SA ¹⁾	比例 Ratio	交互作用类 型 Type of Interaction ²⁾	效应 Response			限制因素类型 Type of limitation ³⁾		
					N	P	Water	N	P	Water
0	1.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N ₁	1.13	-	-	-	13	-	-	-	-	-
N ₂	1.29	-	-	-	29	-	-	-	-	-
N ₃	1.23	-	-	-	23	-	-	-	-	-
P ₁	1.13	-	-	-	-	13	-	-	-	-
P ₂	1.33	-	-	-	-	33	-	-	-	-
P ₃	1.36	-	-	-	-	36	-	-	-	-
N ₁ P ₁	1.26	1.28	0.98	SA	12	12	-	M	M	-
N ₁ P ₂	1.44	1.50	0.96	SA	8	27	-	M	M	-
N ₁ P ₃	1.68	1.54	1.09	S	24	49	-	L	L	-
N ₂ P ₁	1.40	1.46	0.96	SA	24	9	-	M	M	-
N ₂ P ₂	1.53	1.71	0.89	Ant	15	19	-	Ant	Ant	-
N ₂ P ₃	1.49	1.75	0.85	Ant	10	16	-	Ant	Ant	-
N ₃ P ₁	1.31	1.39	0.94	LS	16	7	-	LS	LS	-
N ₃ P ₂	1.40	1.64	0.85	Ant	5	14	-	Ant	Ant	-
N ₃ P ₃	1.31	1.67	0.78	Ant	-4	7	-	Ant	Ant	-

1)SA 为顺序加和, 各限制因素的相对产量相乘计算得出。
SA is sequentially additive, calculated by multiplying the individual relative yield.
2)SA 为顺序加和作用, Ant 为颉颃作用, LS 为李比希协同作用, S 为协同作用。
SA is sequentially additive Ant is antagonistic, LS is Liebig synergistic S is synergistic.
3)S 为协同作用类型, M 为米彻李希类型, L 为李比希类型,
S is synergistic, M is Mitscherlich, L is Liebig.

旱年份,水分是限制冬小麦产量的主要因素,有时施肥量过大或者 N、P 配合不协调,不仅使施肥效益下降,而且还会导致产量下降。值得注意的是,颞颞作用交互类型均发生在高 N 的情况下,这表明在严重干旱的情况下, N 肥用量不宜太多,否则将会产生负效应。经过“八五”攻关,我们初步认为在洛阳地区一般应以 10%土壤含水量作为施肥效应的临界值,在临界值以下, P 仍有增产作用, N 则为负效应。由此可见,量水配方施肥是提高旱地农业生产的重要措施。

最后一种交互类型为李比希协同作用类型 (Liebig-synergistic) (N_3P_1), 它是一种表观的颞颞作用。但是它的单因素增产效应处在 MFYP 的 B 区域内, 因此, 通过 SA 得到的预测值大于根据 MFYP 的 C 区域所得的预测值。在颞颞作用交互类型中, N 的增产效应很小, 但在李比希协同作用类型中, N 的增产效应要大些。

2.2 平水年、丰水年年型下 N、P、水的交互作用

同样以欠水年不施肥为对照, 计算各处理的相对产量和增产效应 (表 5)。在平水年和丰水年, N_1 和水为 SA 交互作用类型, 两者均为米切里希 (Mitscherlich) 限制因素。表明 N 与水均为轻度胁迫, 二者均处于 MFYP 的 C 区域, 因此作物的产量可以通过计算各因素的胁迫大小的乘积得到准确的预测值。由于此时作物产量和各因素投入的多少成正比, 投入的增加因为顺序加和作用而使得产量显著的增加, 而与限制因素增加投入的次序和品质无关。因此, 此时旱地农业生产应该考虑投入和产出的多少, 从而获得最大经济产量。 N_2 、 N_3 和水为协同作用交互作用类型, 两因素均变为李比希限制因素, 这表明在一定条件下, N 和水均处于 MFYP 的 B 区域。在高 N 情况下, 单靠施 N, 而不补充水分, N 肥的后效无法发挥, 产量受水分的限制无法上升; 而低 N 的情况下, 单靠补充灌溉, 产量受到 N 肥的限制也无法上升。当 N、水同时施用二者存在着明显的正交互作用, 产量大幅度提高。正是因为 N、水的相互激励作用而使得其转变为李比希限制因素。而 P 肥的增产效应相对较低, 这表明 P 肥对水分的反应不如 N 肥敏感。

在平水年 N_1P_3 、 N_2P_2 、 N_2P_3 、 N_3P_3 为颞颞作用 (antagonistic) 交互作用类型, N、P、水配合产生副效应。表明在此情况下, N、P 比例不协调, 或者存在另外一个主要限制因素。“八五”研究成果表明洛阳地区旱地冬小麦增施 K、S 肥, 增产效果非常显著。慕成功等研究结果表明, 豫西旱地土壤有效 K 低于 110mg/kg 时, 每公顷应施 K_2O 120 公斤或草木灰 1200 公斤^[6]。丰水年里, N_2P_2 、 N_2P_3 的交互作用类型转变为顺序加和 (SA) 交互作用类型, 这是由于土壤水分的增加克服了 N、P 的颞颞作用, 从而产生了激励作用。表明各因素间的交互作用类型, 是可以通过人为调控措施进行转变的。但是 N_1P_3 还是颞颞作用类型, 而 N_3P_2 、 N_3P_3 变为协同作用, 这表明在土壤含水量较高时, 施肥量必须相应的增加, 特别是 N 肥, 才能获得较高的产量。这就指明了在干旱地区“量水施肥”的重要性。

2.3 不同土壤水分条件下 N、P 的增产效应

在 N_1 水平, N 的增产效应在 3 种不同年型基本上相同; 在 N_2 水平, N 的增产效应大小顺序为平水年>丰水年>欠水年; 在 N_3 水平为丰水年>平水年>欠水年。在欠水年份, 增产效应为 $N_2 > N_3 > N_1$ (图 1), 由此可见, N 的增产效应是和土壤水分紧密联系的。在干旱条件下 (田间持水量 50%以下) 时, 施 N 具有增加叶片“水容”的作用, 增大渗透调节 (0.07~0.23MPa) 作用。小麦叶肉细胞 CO_2 浓度下降 27%~33%, 气孔阻力增加 11.7%~14.3%, 叶面积增加 74.7%~112.9%, 叶面积指数增加 193.4%~242.3%, 适应干

旱能力增强^[4]。但是，N 肥用量过多，则会产生副作用。在丰水年和平水年 N 的增产效应随着 N 肥用量的增加而增加。

表6 平水年、丰水年 N、P、水交互效应分析
Table 6 Relative yields and interactions for N, P and water in normal year
and year with high water

灌水量 Irrigation (mm/a)	处理 Treat	相对产量 relative yield	顺序 加和 SA	比例 Ratio	交互作用 类型 type of Interaction	效应 Response			限制因素类型 Type of limitation		
						N	P	水	N	P	水
600	0	1.20	-	-	-	-	-	20	-	-	-
900	0	1.37	-	-	-	-	-	37	-	-	-
600	N ₁	1.37	1.36	1.01	SA	14	-	21	M	-	M
	N ₂	1.62	1.55	1.05	S	35	-	23	L	-	L
	N ₃	1.64	1.48	1.11	S	37	-	33	L	-	L
900	N ₁	1.58	1.55	1.02	SA	15	-	40	M	-	M
	N ₂	1.81	1.77	1.08	S	32	-	40	L	-	L
	N ₃	1.92	1.69	1.20	S	40	-	56	L	-	L
600	P ₁	1.33	1.28	1.04	SA	-	11	18	-	M	M
	P ₂	1.50	1.60	0.94	LS	-	25	13	-	LS	LS
	P ₃	1.50	1.63	0.92	LS	-	25	10	-	LS	LS
900	P ₁	1.48	1.55	0.95	SA	-	8	31	-	M	M
	P ₂	1.63	1.82	0.90	LS	-	19	23	-	LS	LS
	P ₃	1.61	1.86	0.87	Ant	-	18	18	-	Ant	Ant
600	N ₁ P ₁	1.49	1.54	0.97	SA	12	9	18	M	M	M
	N ₁ P ₂	1.64	1.8	0.91	LS	9	20	14	LS	LS	LS
	N ₁ P ₃	1.62	1.85	0.88	Ant	8	18	-4	Ant	Ant	Ant
900	N ₁ P ₁	1.68	1.73	0.97	SA	14	6	33	M	M	M
	N ₁ P ₂	1.81	1.97	0.92	SA	11	15	26	M	M	M
	N ₁ P ₃	1.77	2.3	0.77	Ant	10	12	5	Ant	Ant	Ant
600	N ₂ P ₁	1.71	1.76	0.97	SA	29	6	22	M	M	M
	N ₂ P ₂	1.82	2.05	0.89	Ant	21	12	19	Ant	Ant	Ant
	N ₂ P ₃	1.76	2.1	0.84	Ant	17	9	18	Ant	Ant	Ant
900	N ₂ P ₁	1.99	1.92	1.04	SA	34	10	42	M	M	M
	N ₂ P ₂	2.08	2.1	0.99	SA	28	15	36	M	M	M
	N ₂ P ₃	1.99	2.04	0.98	SA	24	10	34	M	M	M
600	N ₃ P ₁	1.72	1.67	1.03	SA	29	5	31	M	M	M
	N ₃ P ₂	1.78	1.97	0.90	LS	19	9	27	LS	LS	LS
	N ₃ P ₃	1.66	2.00	0.83	Ant	11	1	27	Ant	Ant	Ant
900	N ₃ P ₁	2.08	1.79	1.16	S	41	8	59	L	L	L
	N ₃ P ₂	2.12	1.92	1.10	S	30	10	51	L	L	L
	N ₃ P ₃	1.98	1.79	1.10	S	23	3	51	L	L	L

由图 2 可以看出，不论 P 肥处于何种水平，P 肥的增产效应为欠水年>平水年>丰水年，表明在干旱年份，作物对 P 有良好的作用。“八五”研究结果表明^[6]，干旱地区施

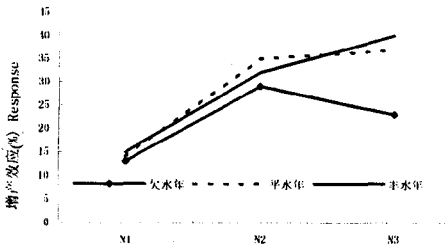


图1 不同年份N的增产效应
Fig.1 The response of N in different types of soil water condition

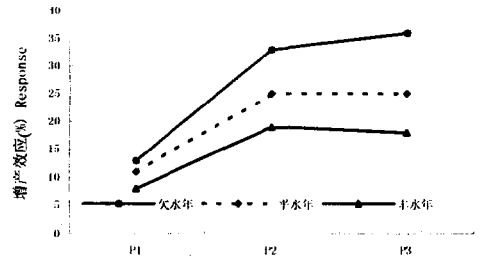


图2 不同年份下 P 的增产效应
Fig.2 The response of P in different types of soil water condition

用 P 肥对叶片渗透调节能力和膜稳定性及小麦抗旱性有着特殊的作用。图 2 还可以看出，在丰水年，P₂、P₃ 的增产效应基本相等，且有减小趋势，表明多余作物需要量的过量 P 肥，有时也会降低 P 肥的肥效。这是由于成熟进程的加速，导致营养生长减少的缘故。

在低 N 水平时，当 P 肥用量较小时，无论是何种年型，N 的增产效应基本是相等的。而 P 肥提高用量后，N 肥在欠水年的增产效应远远大于平水年和丰水年（图 3）。这可能是因为 P 营养的生理功能主要是改善了根系的水分状况，提高根水势，增加蒸腾蒸发量，进而促进地下部生长，从而使冬小麦利用 N 肥的能力大大增强，提高了作物产量。在中 N 和高 N 水平，N 在丰水年的增产效应大于平水年和欠水年。在欠水年 N 肥用量过多，还会产生负的增产效应，造成减产。

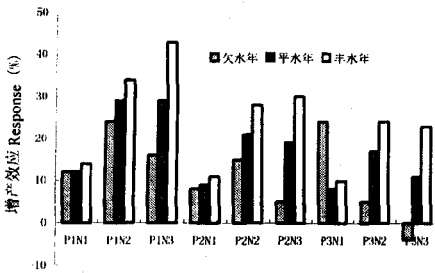


图3 不同年份N、P配合N的增产效应
Fig.3 The response of P in different compositions of N and P

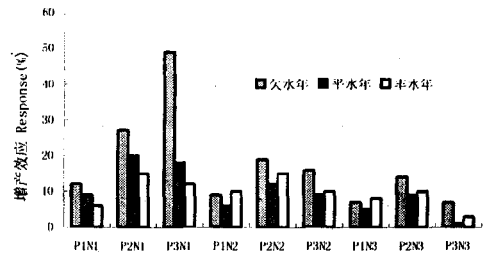


图4 不同年份N、P配合P的增产效应
Fig.4 The response of P in different compositions of N and P

在欠水年低 N 情况下，P 的增产效应较大。这是因为在水分胁迫条件下增施磷肥，对根水势提高的作用很大，这增强了作物抗旱性^[6]。所以欠水年份，促进根苗生长，提高水分利用率的有效方法，是根据土壤水分状况调节 N、P 的用量。而在平水年和丰水年 P 增产效应较小，这可能是由于土壤含水量的增加增大了土壤原存 P 的有效利用（图 4）。

由图 1, 2, 3 还可以看出，在欠水年，N、P 的增产效应普遍较小。这是因为大部分的植物养分（特别是 P）是存在于土壤的表层，而表土层在土壤发生干旱时首先变干，

这时作物可能仍然达到充足的水分供应, 但是作物的生长则受到养分缺乏的限制, 因为植物根不能从干燥的表土层吸取养分^[7]。在丰水年和平水年, N、P 的增产效应较高, 其中一个重要的原因就是由于作物能更有效地利用表土层中的养分, 而只有当 N、P、水协调好, 才会产生激励机制, 从而充分提高肥料利用率和水分利用率, 获得较高产量和经济效益。图 4 中 P 肥在欠水年的增产效应最大 (N_3P_1 除外), 这是因为 P 肥有提高作物的抗旱作用。

在丰水年和平水年, 当肥料配比为高 P 低 N 时, 水分利用率最低, 甚至产生负效应。水分单独与 N 肥配合时的增产效应普遍高于和 P 的增产效应, 在水分充足的情况下, 增施 N 肥有很好的增产效应 (图 5)。

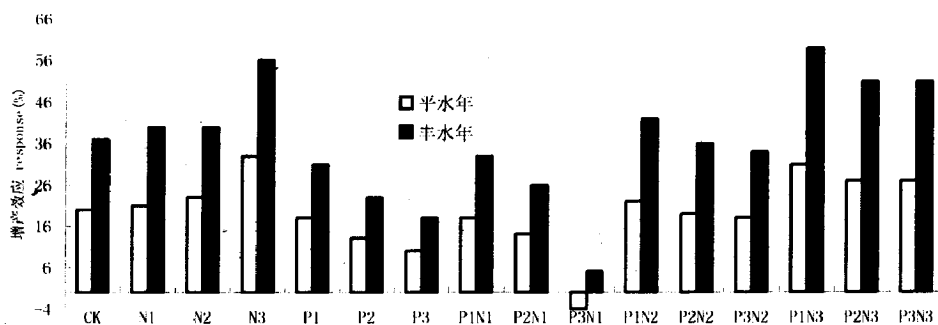


图 5 不同年份 N、P 配合水的增产效应

Fig. 5 The response of water at different composition under different soil water condition

不同的 N、P、水配合, N、P、水的增产效应差别很大, 这表明肥和水存在着较为复杂的交互作用(图 3、4、5)。肥水激励机制的研究是生产和科学发展的需要。特别是在旱地农业中, 植物营养的基本问题是如何在水分胁迫下, 合理地使用肥料, 充分发挥肥和水的激励机制和协同效应, 提高水分的利用效率和不增加施肥数量的情况下, 获得最大的经济效益。肥和水的协调供应, 同样能利用较低的投入, 获得较大的经济效益^[8]。

参考文献

- 1 陈万金等主编. 中国北方旱地农业综合发展与对策. 中国农业科技出版社, 1995, 169~172.
- 2 徐中儒. 农业实验最优回归设计. 黑龙江科技出版社, 1989.
- 3 Arthur Wallace and Garn A. Wallace. Interactions encountered when supplying nitrogen and phosphorus fertilizer and a water-soluble polyacrylamide to soil. J. of plant nutri., 1990, 13(3&4): 343~347.
- 4 Arthur Wallace. Crop improvement through multidisciplinary approaches to different types of stresses- law of the maximum. J. of plant nutri., 1990, 13(3&4): 313~325.
- 5 Arthur Wallace Interactions of two parameters in crop production and in general biology: sequential additivity, synergism, antagonism. J. of plant nutri., 1990, 13(3&4): 327~342.
- 6 汪德水主编. 旱地农田肥水关系原理与调控技术. 中国农业科技出版社, 1996.
- 7 E. W. 腊塞尔. 土壤条件与植物生长. 科学出版社, 1984, 24~30.
- 8 王晓方主编. “八五”国家农业科技攻关论文选萃. 中国农业科技出版社, 1996, 259~265.

[下转第 45 页]