

云南地方稻核心种质氮磷高效性

曾亚文^{1,2}, 杜娟¹, 普晓英¹, 张浩¹, 周国华^{1,2}, 杨树明¹, 杨晓娟¹

(1. 云南省农业科学院生物技术与种质资源研究所, 昆明 650205; 2. 云南农业大学, 昆明 650201)

摘要: 采用盆栽试验以红壤设置不施磷(有效磷 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)和施磷(有效磷 $69.76 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、不施氮(有效氮 $156.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)和施氮($232.18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)4种处理,以16个形态性状的相对指标用SPSS软件分析了来自云南省16个州548份云南稻核心种质氮磷高效的地带性特征,结果表明:低有效磷胁迫下云南稻核心种质形态性状生态差异磷效应明显高于氮效应;提出了茎蘖数、秆重、生物产量、根重、全株重和穗重共6个相对指标既可作为云南稻核心种质磷高效和氮高效基因型筛选的理想指标,又能反映州市间核心种质氮磷高效的地带性特征。聚类分析显示云南16个州市稻核心种质氮高效和磷高效特性划分为3个地带性区域,并与山脉水系、土壤肥力、生态因子和遗传多样性有关。

关键词: 氮高效;磷高效;地带性特征;核心种质;云南地方稻

文章编号:1000-0933(2008)12-6355-09 中图分类号:Q945, S311, S314 文献标识码:A

Characteristics of nitrogen and phosphorus efficiency of core collection for rice landraces in Yunnan, China

ZENG Ya-Wen^{1,2}, DU Juan¹, PU Xiao-Ying¹, ZHANG Hao¹, ZHOU Guo-Hua^{1,2}, YANG Shu-Ming¹, YANG Xiao-Juan¹

¹ Biotechnology and Genetic Resources Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650205, China

² Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(12): 6355 ~ 6363.

Abstract: Zonal characteristics of nitrogen and phosphorus efficiency of rice landraces were investigated, based on relative index of 16 morphological traits within the core collection of 548 accessions from 16 prefectures in Yunnan Province, using SPSS software analysis and potted plant trials with red soil, and setting four treatments between unapplied phosphorus (available phosphorus $0.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) versus applied phosphorus (available phosphorus $69.76 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) as well as unapplied nitrogen (available nitrogen $156.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) and applied nitrogen (available nitrogen $232.18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). Results are as follows: Ecological difference of phosphorus response of morphological traits for rice landraces in Yunnan under phosphorus deficiency stress is more significantly than that of nitrogen response; The relative index of six traits (stem-tiller number, stalk weight, biomass, root weight, total plant weight and spike weight) are gene type screening index for nitrogen and phosphorus efficiency tolerance of core collection for rice landraces in Yunnan, and reflecting its zonal characteristics of

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 30660092, 30260060); 云南省省院省校合作资助项目 (2006YX12); 云南省人才培养引进资助项目 (2005PY01-14)

收稿日期: 2007-08-03; **修订日期:** 2008-03-25

作者简介: 曾亚文 (1967 ~), 男, 云南昆明人, 博士生, 研究员, 从事作物种质资源及其生态环境研究。

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zengyw1967@126.com

Foundation item: The project was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 30660092, 30260060); Cooperation Program between Province and Zhejiang University from Yunnan Provincial Scientific and Technology Department (No. 2006YX12) and Yunnan Introduction and Foster Talent (No. 2005PY01-14)

Received date: 2007-08-03; **Accepted date:** 2008-03-25

Biography: ZENG Ya-Wen, Ph. D. candidate, Professor, mainly engaged in crop genetic resources and agroecology.

nitrogen and phosphorus efficiency. Cluster analysis showed that 16 prefectures are divided into three zonal type based on the nitrogen and phosphorus efficiency characteristics of core collection for rice landraces in Yunnan Province, and it is associated with the cordillera, water system, soil fertility, ecological factors and genetic diversity.

Key Words: nitrogen efficiency; phosphorus efficiency; zonal characteristics; core collection; rice landraces in Yunnan

野生稻驯化出多样性丰富的亚洲栽培稻,由中国云南和印度阿萨姆等地传播至全球而持续发展,成为世界一半以上人口的主食^[1]。40 多年来以矮秆基因利用为主的首次绿色革命施氮磷肥增产显著,却导致生物多样性丧失、土壤肥效低、磷源枯竭、环境污染和食品“不安全”等问题^[2]。2003 年中国生产稻米占世界 20% 而氮磷肥用量占世界 37%^[3];长江流域排放总氮、磷分别为 $(79.92 \pm 28.30) \times 10^4 \text{ t}$ 和 $(10.38 \pm 3160) \times 10^4 \text{ t}$ ^[4],诱发水体富营养化^[5]和威胁饮用水安全^[6]。尽管水稻精细管理少投入 25% 而增产 8%^[7]和菌类溶解提高磷肥利用率^[8],但最有效的途径是肥高效品种利用土壤中氮磷源来解决首次绿色革命问题,但迄今缺乏相应的水稻品种。

亚洲栽培稻 12000 多个品种是适应全球生态和生长条件选择的结果^[9];以中国地方稻 50526 份及其核心种质的形态、同工酶和 SSR 标记揭示云南是中国稻种最大的遗传多样性中心^[10];太湖地方晚粳间性状差异极显著^[11];这些稻种中孕藏着丰富的氮磷高效基因源。国内外水稻氮磷高效研究在评价指标^[12]、基因克隆^[13]和分子生理机理^[14~16]等方面进展显著。据 1989 年《云南省第二次土壤普查资料》,云南耕地均需补给氮素;土壤中有有效磷 $< 6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 水田 $> 50\%$,这与中国土壤有效磷 $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 目标值^[17]差距甚远。云南籼稻磷高效特性强于粳稻^[18];859 份糙米磷平均含量 $(3806 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1})$ 是土壤全磷的 7.2 倍,糙米 8 种矿质元素多样性中心与形态、同工酶和 SSR 标记确定的云南稻种遗传多样性中心相似^[19~21]。因此,研究低有效磷胁迫下来自云南 16 个州市稻核心种质形态性状的氮、磷高效特性的地带性差异,不仅对水稻氮磷高效基因型筛选培育和控制农田面源污染有较高实用价值,而且对揭示云南稻种肥高效特性的成因和制定生态环境保护策略提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试材料 548 份核心种质是 5285 份云南地方稻种经形态、同工酶和 SSR 标记筛选确定的,代表了云南稻种 90% 以上的遗传多样性;来自于 16 个州市份数(括号内),即昆明(4)、昭通(36)、曲靖(14)、玉溪(27)、思茅(109)、临沧(97)、保山(39)、丽江(20)、文山(30)、红河(41)、西双版纳(61)、楚雄(5)、大理(5)、德宏(48)、怒江(9)和迪庆(3)。

1.2 鉴定方法

磷高效特性鉴定(I) 以昆明市阿子营乡 20 多年未施过化肥的酸性红壤 20 cm 的表层土为土培介质,经云南省农业科学院农业资源环境研究所测定:有效磷和总磷含量分别为 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1050 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效氮和总氮含量分别为 $146.99 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1820 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效钾和总钾分别为 $207.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $12320 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH 值为 5.49。每盆 4.0 kg 土壤栽 3 苗,2 次重复,每个材料设不施磷肥和施 4 g 普钙/盆两种处理;按晋宁磷肥厂生产的普钙含 P_2O_5 为 16% 和 P_2O_5 分子量计算出 4 kg 土壤施 4 g 普钙时土壤有效磷含量理论值为 $69.76 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。2004 年 4 月 1 日移栽,田间考察茎蘖数和叶长宽,成熟时取样考查株高、穗长、1~2 节长、穗颈长、穗下节长、有效穗、实粒数、秕粒数、穗重、秆重、生物产量、根重和全株重共 16 个形态性状。为消除不同品种间自身生物特性的差异,采用相对形态指标 $(T = T_0/T_p \times 100\%)$,其中 T_0 代表不施磷水稻形态性状, T_p 代表施磷的水稻形态性状揭示低有效磷胁迫下云南稻核心种质的磷高效特性。为了比较云南稻核心种质磷高效特性的地带性及其系统地理学关系,计算云南省 16 个州市水稻核心种质形态性状间相对指标的平均值、标准差(SD)及变异系数(CV),用 SPSS11.5 软件对 16 个州市核心种质的 16 个性状磷高效特性相对指标进行显著性检

验,并以平均值和变异系数数据进行聚类分析(图1)。

氮高效特性鉴定(Ⅱ) 取云南嵩明县阿子营乡(海拔2150m)20多年未施过化肥的酸性红壤水稻土,经云南省农业科学院农业资源环境研究所测定:土壤有效磷和总磷含量分别为 $2.53\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和全磷 $1280\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、有效氮和总氮含量分别为 $156.70\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $1720\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、有效钾和总钾分别为 $137.85\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $10065\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和pH值6.03。548份云南稻种核心种质2005年3月16日播种,试验在云南省农业科学研究院内日光温室进行,用盆栽种植每盆装干土4kg,设施氮(2g尿素/盆)和不施氮两个处理;按云天化化肥工业集团生产的尿素含N量46.7%计算出4kg土壤施2g尿素时土壤有效氮含量理论值为 $232.18\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。4月18日移栽,每盆栽3苗,2次重复。营养生长期分6次调查茎蘖数,找出最高茎蘖数;成熟期考察株高、有效穗、穗茎长、1~2节长、穗下节长、剑叶长、剑叶宽7个性状;室内考种8个性状:穗长、每穗实粒数、秕粒数、结实率、秆重、生物产量、根重和全株重共16个形态性状。

为消除不同品种间自身生物特性的差异,采用相对形态指标($T = T_0/T_n \times 100\%$),其中 T_0 代表不施氮水稻形态性状, T_n 代表施氮的水稻形态性状)揭示低有效磷胁迫下云南稻核心种质的氮高效特性。为了比较云南稻核心种质氮高效特性的地带性异及其系统地理学关系,计算云南省16个州市水稻核心种质不施氮对施氮肥下形态性状间相对指标的平均值、标准差(SD)及变异系数(CV),用SPSS11.5软件对16个州市核心种质的16个性状氮肥效应相对指标进行显著性检验,并以平均值和变异系数数据进行聚类分析(图2)。

地理生态型聚类 按1989年《云南省第二次土壤普查资料》和1986年《全国养分分级统一标准表》相关资料整理出云南16个地州土壤有效磷含量 $<10\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的土壤面积所占本州比例,构成16个州缺磷土壤数据;按已报道的云南省16个州市行政区、稻作区划图^[21]及生长期间历年的海拔及其20a气象资料整理出稻作区海拔分布、气温和降雨量数据^[22],用SPSS11.5软件对16个州市对缺磷土壤、稻作区海拔分布、气温和降雨量数据进行聚类分析(图3)。

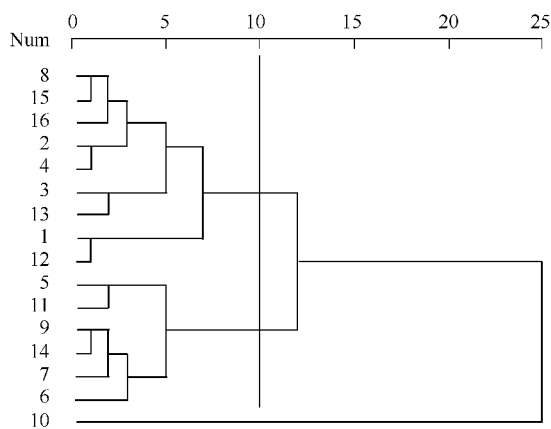


图2 16个州市稻种氮高效特性聚类图

Fig. 2 Cluster of N-deficiency of rice from 16 prefectures

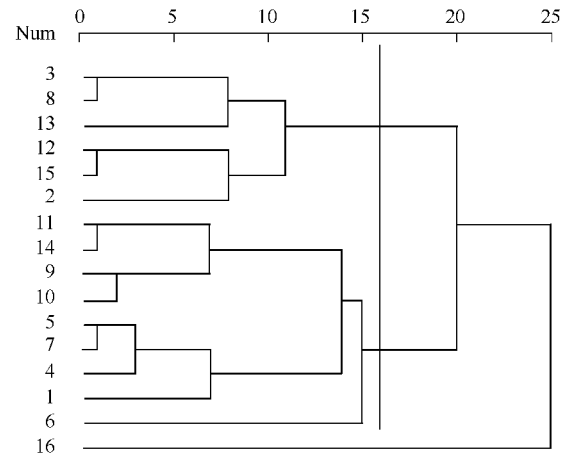


图1 16个州市稻种磷高效特性聚类图

Fig. 1 Cluster of P-deficiency of rice from 16 prefectures

1:昆明 Kunming; 2:昭通 Zhaotong; 3:曲靖 Qujiu; 4:玉溪 Yuxi; 5:思茅 Simao 6:临沧 Lincang; 7:保山 Baoshan; 8:丽江 Lijiang; 9:文山 Wenshan; 10:红河 Honghe; 11:西双版纳 Xishuangbanna; 12:楚雄 Chuxiong; 13:大理 Dali; 14:德宏 Dehong; 15:怒江 Nujiang; 16:迪庆 Diqing; 下同 the same below

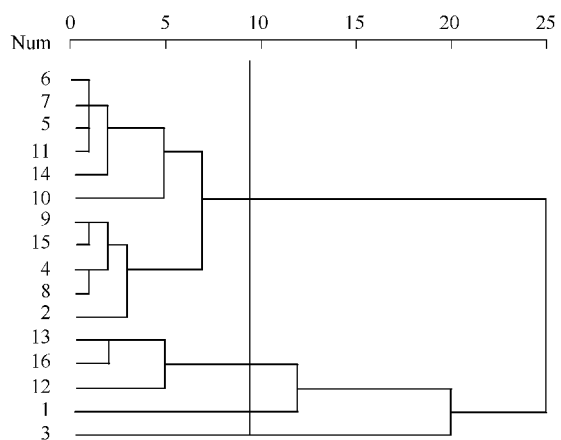


图3 16个州市生态因子聚类图

Fig. 3 Cluster of ecological factors in 16 prefectures

2 结果与分析

2.1 低有效磷胁迫下云南稻核心种质形态性状的磷效应和氮效应

在磷高效鉴定下形态性状的两种处理相对指标可较准确地反应核心种质对土壤中无效磷 ($1050 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的活化能力即云南稻种磷高效特性, 结果证实云南稻核心种质对土壤中无效磷特性的基因型差异是明显的。基于 pH 值为 5.49 不磷肥时为无效磷土壤 (有效磷、氮和钾分别为 0.02 、 $146.99 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $207.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 总磷、氮和钾分别为 1050 、 $1820 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $12320 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 及其施 4 g 含 $16\% \text{ P}_2\text{O}_5$ 普钙时土壤有效磷理论值达 $69.76 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 对云南稻 16 个州市间核心种质 16 个形态性状相对指标平均值和标准差 (即处理 I) 列于表 1。16 个州市间相对性状平均值 $>80\%$ 有 2 个性状 (穗长 $83.5\% \sim 94.8\%$, $1 \sim 2$ 节长 $82.2\% \sim 123.4\%$)。

表 1 低有效磷胁迫下不施肥对施肥磷肥 (I) 16 个州市稻核心种质形态性状相对指标 % 平均值和标准差

Table 1 Mean and SD of relative index % for morphological traits of unapplied versus applied P-fertilizer (I) for core collection from 16 prefectures under phosphorus deficiency stress

处理-州市 Treatment- prefecture	株高 Plant hight	茎蘖数 Tillers/plant	叶长 Leaf length	叶宽 Leaf width	秆重 Stalk weight	生物产量 Biomass	根重 Root weight	全株重 Total plant weight
I-1	75.5 ± 71.4	50.0 ± 43.3	132.9 ± 37.6	154.0 ± 63.9	40.6 ± 11.6	44.3 ± 21.2	51.4 ± 16.0	44.2 ± 15.0
I-2	89.5 ± 15.3	58.0 ± 24.7	87.2 ± 32.2	84.4 ± 29.3	61.0 ± 45.4	56.5 ± 29.8	56.9 ± 33.2	56.1 ± 28.6
I-3	85.6 ± 16.5	54.5 ± 18.7	85.8 ± 24.3	84.7 ± 24.8	50.3 ± 37.1	49.2 ± 34.8	52.5 ± 25.3	47.9 ± 25.6
I-4	74.7 ± 35.9	42.4 ± 28.9	76.3 ± 49.8	69.0 ± 44.0	52.3 ± 27.4	49.4 ± 23.7	59.0 ± 59.0	50.3 ± 21.0
I-5	81.1 ± 48.8	57.3 ± 53.8	76.9 ± 55.4	74.9 ± 54.6	53.7 ± 27.6	48.6 ± 24.3	53.5 ± 35.5	48.6 ± 23.9
I-6	84.6 ± 44.4	61.3 ± 43.6	83.9 ± 57.7	87.4 ± 56.8	54.9 ± 29.0	51.9 ± 25.2	62.3 ± 51.7	52.8 ± 22.1
I-7	68.0 ± 43.2	32.6 ± 29.6	61.3 ± 49.7	61.5 ± 51.7	46.4 ± 27.6	40.5 ± 21.2	60.5 ± 46.5	44.5 ± 21.5
I-8	85.6 ± 12.9	57.8 ± 20.3	95.4 ± 29.5	82.2 ± 24.2	56.3 ± 48.3	58.2 ± 52.8	61.7 ± 30.7	56.5 ± 36.6
I-9	101.9 ± 41.3	72.6 ± 30.5	104.0 ± 50.3	103.6 ± 44.0	66.5 ± 34.6	63.6 ± 29.5	80.0 ± 53.9	65.7 ± 31.6
I-10	87.0 ± 34.2	57.1 ± 31.0	106.4 ± 72.3	98.5 ± 63.0	47.5 ± 30.7	41.4 ± 26.8	52.4 ± 39.6	43.7 ± 24.2
I-11	59.9 ± 50.9	50.5 ± 44.9	41.3 ± 43.6	45.9 ± 49.1	55.4 ± 31.6	47.9 ± 21.9	53.2 ± 28.0	47.6 ± 20.4
I-12	80.0 ± 9.2	66.5 ± 24.9	85.8 ± 10.6	62.4 ± 14.8	49.5 ± 5.9	45.0 ± 9.1	79.4 ± 19.6	49.6 ± 6.0
I-13	83.1 ± 10.4	45.3 ± 19.0	89.5 ± 12.3	77.8 ± 14.7	46.0 ± 22.2	39.2 ± 11.9	38.7 ± 14.3	38.1 ± 10.3
I-14	78.3 ± 51.1	53.2 ± 39.8	63.8 ± 51.7	63.8 ± 52.1	61.0 ± 36.7	60.0 ± 34.8	57.9 ± 24.0	57.7 ± 27.7
I-15	92.6 ± 13.1	57.4 ± 21.5	98.3 ± 13.8	90.5 ± 14.1	51.5 ± 13.1	51.0 ± 11.7	84.8 ± 42.0	55.1 ± 15.2
I-16	80.4 ± 6.2	46.2 ± 12.5	139.1 ± 40.6	103.9 ± 7.3	48.1 ± 23.0	49.0 ± 18.8	36.3 ± 10.8	45.3 ± 16.0
处理-州市 Treatment- prefecture	穗长 Spike length	1~2 节长 1~2 node length	穗颈长 Peduncle length	穗下节长 Node length under spike	有效穗 Effective panicles	实粒数 Full grains /spike	秕粒数 Blighted grains/spike	穗重 Spike weight
I-1	93.3 ± 18.9	94.4 ± 20.8	21.9 ± 38.0	91.8 ± 88.5	50.0 ± 43.3	63.4 ± 64.8	158.5 ± 50.4	51.0 ± 38.8
I-2	91.7 ± 20.0	98.6 ± 29.8	291.0 ± 787.3	100.2 ± 17.2	70.1 ± 32.8	77.7 ± 33.5	122.7 ± 117.3	55.7 ± 25.3
I-3	88.0 ± 15.1	103.2 ± 26.5	117.1 ± 102.0	93.8 ± 19.6	64.5 ± 22.2	61.3 ± 28.1	136.3 ± 77.4	48.3 ± 33.9
I-4	87.4 ± 11.7	89.8 ± 23.2	72.4 ± 110.3	71.1 ± 42.9	52.6 ± 37.6	68.2 ± 51.6	155.3 ± 129.2	45.6 ± 24.8
I-5	85.6 ± 27.6	94.6 ± 39.8	53.9 ± 141.2	81.0 ± 51.5	60.8 ± 41.7	53.4 ± 48.3	215.7 ± 308.7	45.0 ± 34.2
I-6	90.1 ± 20.9	97.6 ± 32.4	62.3 ± 246.6	87.7 ± 47.5	62.3 ± 38.3	79.8 ± 152.3	196.4 ± 249.2	56.8 ± 48.2
I-7	94.8 ± 29.0	99.3 ± 40.2	53.3 ± 95.5	60.8 ± 47.4	38.5 ± 34.1	43.3 ± 40.9	243.8 ± 301.7	36.8 ± 32.8
I-8	92.9 ± 10.2	107.6 ± 59.0	175.6 ± 230.6	91.9 ± 30.3	63.9 ± 23.6	68.2 ± 27.5	142.0 ± 130.2	63.4 ± 61.9
I-9	88.1 ± 30.0	96.4 ± 43.0	104.3 ± 288.0	97.9 ± 48.2	81.5 ± 59.8	252.1 ± 457.9	75.3 ± 29.0	59.2 ± 32.6
I-10	84.7 ± 25.7	97.0 ± 35.5	60.3 ± 164.7	95.4 ± 46.0	47.0 ± 40.2	185.9 ± 223.3	64.5 ± 36.3	32.5 ± 25.2
I-11	83.4 ± 23.9	86.7 ± 64.2	27.7 ± 66.7	57.0 ± 48.5	33.5 ± 36.1	173.1 ± 152.3	55.1 ± 45.4	40.1 ± 29.0
I-12	84.3 ± 10.0	90.4 ± 17.7	245.8 ± 313.9	88.8 ± 11.6	49.5 ± 23.2	189.6 ± 134.1	63.3 ± 22.3	41.8 ± 19.4
I-13	88.8 ± 7.0	123.4 ± 30.7	98.9 ± 110.2	97.0 ± 12.2	73.3 ± 78.3	190.7 ± 138.2	63.9 ± 33.7	32.9 ± 11.7
I-14	88.4 ± 12.2	98.8 ± 30.3	52.7 ± 118.4	75.2 ± 57.2	99.9 ± 123.8	166.7 ± 134.6	56.8 ± 45.4	70.8 ± 68.8
I-15	92.6 ± 9.4	98.4 ± 16.9	300.7 ± 474.4	111.0 ± 34.8	88.6 ± 44.3	135.0 ± 102.0	58.9 ± 19.4	57.8 ± 23.5
I-16	90.3 ± 9.2	82.2 ± 25.1	0.0 ± 0.0	87.3 ± 6.8	72.9 ± 1.7	130.2 ± 113.8	65.5 ± 13.5	53.3 ± 11.1

相对指标平均值 30% ~ 80% 有 6 个性状(茎蘖数 32.6% ~ 72.6%, 秆重 40.6% ~ 66.4%、生物产量 39.1% ~ 63.6%、根重除怒江州外 36.3% ~ 80.0%、全株重 38.1% ~ 65.7% 和穗重 32.5% ~ 70.8%), 州市间相对指标平均值变异大的有 8 个性状(株高 59.9% ~ 101.9%, 叶长 41.3% ~ 139.1%, 叶宽 45.5% ~ 154.0%, 穗颈长除迪庆外 21.9% ~ 291.0%, 穗下节长 57.0% ~ 111.0%, 有效穗数 33.5% ~ 99.9%, 实粒数 43.3% ~ 252.1% 和秕粒数 55.1% ~ 243.8%)。显著性检验结果表明 16 个州市间仅西双版纳与昭通、丽江、文山不施磷肥对施磷肥相对株高差异显著, 相对叶长仅西双版纳与 9 个州市差异显著; 相对叶宽西双版纳和昆明分别与 11 个和 9 个州市差异显著, 文山和红河与 5 个州市差异显著; 相对 1 ~ 2 节长仅大理与玉溪、西双版纳差异显著, 丽江与西双版纳差异显著; 相对有效穗保山与 10 个州市差异显著, 文山与 3 个州市差异显著; 相对实粒数西双版纳与 3 个州市差异显著, 昭通与保山差异显著; 相对穗长、穗下节长和秕粒数州市间差异不显著, 这表明 8 个相对指标(叶长宽、穗长、实粒数、秕粒数、1 ~ 2 节长、穗颈长和穗下节长)不能作为云南稻核心种质磷高效基因型间筛选指标。相反, 相对茎蘖数保山、文山分别与 4 个和 2 州市差异显著; 相对秆重保山与文山、德宏差异显著, 文山与思茅、红河差异显著; 相对生物产量除 6 州市(昆明、昭通、丽江、楚雄、怒江)与其它州市差异不显著, 文山与 8 个州市差异显著, 玉溪与西双版纳、保山与德宏差异显著; 相对根重文山与 11 个州市差异显著, 大理与怒江差异显著; 相对全株重文山与 9 个州市差异显著; 相对穗重德宏与 7 个州市差异显著, 临沧、保山、红河与 5 个州市差异显著, 西双版纳与丽江、文山差异显著。因此显著性检验揭示茎蘖数、秆重、生物产量、根重、全株重和穗重共 6 个相对指标既可云南稻核心种质磷高效基因型间筛选的理想指标, 又反映了州市间核心种质磷高效特性的地带性差异, 2 个相对指标(叶宽和有效穗)可作为参考指标。

用严重缺有效磷土壤氮高效鉴定下形态性状的两种处理相对指标可较准确地反应核心种质对严重缺有效磷土壤中氮素的利用能力即云南稻种氮磷高效特性, 结果证实云南稻核心种质利用土壤中氮磷能力的基因型差异是明显。基于 pH 值为 6.03 土壤中不施肥时为严重缺有效磷土壤(有效磷、氮和钾分别为 2.53、156.70 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 137.85 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 总磷、氮和钾分别为 1280、1720 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 10065 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和酸性红壤(pH = 6.03) 设置不施氮肥(有效氮 156.70 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和施氮肥(2g 尿素/4kg 土壤, 土壤有效氮理论值为 232.18 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 对云南稻 16 个州市间核心种质 16 个形态性状相对指标平均值和标准差(即处理 II)列于表 2。16 个州市间相对性状平均值 > 80% 有 8 个性状(株高 81.8% ~ 93.1%, 叶长 90.0% ~ 99.5%, 叶宽 90.4% ~ 96.4%, 穗长 89.5% ~ 97.5%, 1 ~ 2 节长 90.7% ~ 97.2%, 穗颈长 89.5% ~ 97.5%, 穗下节长 89.7% ~ 97.5% 和秕粒数除红河外 125.7% ~ 165.8%); 相对指标平均值 30% ~ 80% 有 8 个性状(50.3% ~ 67.3%, 秆重 50.3% ~ 55.1%, 生物产量 42.0% ~ 54.0%, 根重 53.4% ~ 66.7%, 全株重 47.9% ~ 61.9%, 有效穗数 50.8% ~ 61.3%, 实粒数 30.1% ~ 38.6% 和相对穗重 30.1% ~ 56.2%)。显著性检验结果表明 16 个州市间除楚雄外仅昆明与其他 14 个州市间不施氮肥对施氮肥相对株高差异显著, 文山与 5 个州市差异显著; 相对叶宽仅玉溪与 12 个州市间差异显著, 相对 1 ~ 2 节长仅思茅与保山、西双版纳及昆明与怒江差异显著, 相对穗下节长仅文山与玉溪、临沧及玉溪与迪庆差异显著; 相对有效穗仅大理、丽江分别与 10 个和 8 个州市间差异显著; 相对实粒数仅重冷害区丽江与轻冷害区思茅、临沧、西双版纳间差异显著, 相对秕粒数仅文山与保山差异显著, 相对叶长、穗长和穗颈长州市间差异不显著, 这表明 8 个相对指标(叶长宽、穗长、实粒数、秕粒数、1 ~ 2 节长、穗颈长和穗下节长)不能作为云南稻核心种质磷高效基因型间筛选指标。相反, 相对茎蘖数大理、红河分别与 9 个和 4 州市、丽江与文山、楚雄与迪庆差异均显著; 而相对秆重除 6 个州市(昆明、大理、怒江、迪庆、曲靖和保山)外 12 个州市与其它州市差异显著数目为 3 ~ 7 个; 相对生物产量 5 个州市(昆明、曲靖、楚雄、大理、迪庆)与其它州市差异不显著, 红河与 9 个州市间差异不显著, 玉溪与 3 个州市间差异不显著; 相对根重 10 个州市(昆明、曲靖、玉溪、临沧、保山、丽江、西双版纳、楚雄、怒江、迪庆)与其它州市差异不显著, 昭通与思茅、红河、大理差异显著, 文山与红河、大理差异显著, 德宏与红河、大理差异显著; 相对全株重 5 个州市(昆明、曲靖、楚雄、大理、迪庆)与其它州市差异不显著, 红河与 9 个州市差异显著, 玉溪和临沧与 3 个州市差异显著; 相对穗重 3 个州市(昆明、怒江、迪庆)与其它州市差异不显著, 西双版纳、大理分别与 9 个和 8 个州

市差异显著,临沧与 6 个州市差异显著,德宏与 3 个州市差异显著。因此显著性检验揭示茎蘖数、秆重、生物产量、根重、全株重和穗重共 6 个相对指标既可作云南稻核心种质氮高效基因型间筛选的理想指标,又反映了州市间核心种质氮高效特性的地带性差异,相对株高和相对有效穗可作为参考指标。

表 2 低有效磷胁迫下不施肥对施氮肥(Ⅱ)16 个州市稻核心种质形态性状相对指标%平均值和标准差

Table 2 Mean and SD of relative index % for morphological traits of unapplied versus applied N-fertilizer(Ⅱ) for core collection from 16 prefectures under phosphorus deficiency stress

处理-州市 Treatment- prefecture	株高 Plant height	茎蘖数 Tillers/plant	叶长 Leaf length	叶宽 Leaf width	秆重 Stalk weight	生物产量 Biomass	根重 Root weight	全株重 Total plant weight
Ⅱ-1	83.5 ± 26.0	54.4 ± 39.2	90.3 ± 25.8	91.7 ± 18.9	51.3 ± 38.0	43.6 ± 27.5	53.4 ± 37.5	48.6 ± 34.1
Ⅱ-2	83.9 ± 26.8	58.6 ± 44.1	91.5 ± 28.9	90.4 ± 24.9	50.3 ± 40.6	42.0 ± 33.9	53.9 ± 38.2	47.9 ± 34.7
Ⅱ-3	81.8 ± 29.1	52.4 ± 41.5	92.5 ± 37.0	91.0 ± 27.4	51.6 ± 43.7	43.7 ± 37.3	54.2 ± 45.1	49.1 ± 37.2
Ⅱ-4	82.8 ± 28.3	56.2 ± 46.9	93.8 ± 34.8	91.5 ± 25.9	51.8 ± 42.7	42.9 ± 36.2	53.9 ± 45.6	48.5 ± 37.4
Ⅱ-5	93.1 ± 47.7	66.3 ± 59.7	99.5 ± 51.6	96.4 ± 42.4	53.9 ± 55.8	52.3 ± 51.0	63.1 ± 65.1	57.6 ± 56.8
Ⅱ-6	92.6 ± 42.9	65.6 ± 58.7	98.8 ± 47.1	96.4 ± 35.9	54.9 ± 50.3	54.8 ± 48.9	63.7 ± 60.8	59.4 ± 54.5
Ⅱ-7	90.6 ± 36.8	67.3 ± 59.7	96.9 ± 49.1	91.9 ± 30.0	53.1 ± 47.1	50.9 ± 47.1	62.2 ± 55.5	56.7 ± 49.9
Ⅱ-8	87.5 ± 28.4	64.7 ± 50.6	96.0 ± 37.9	95.0 ± 34.7	55.1 ± 45.8	55.8 ± 47.8	64.5 ± 50.8	60.1 ± 47.6
Ⅱ-9	92.4 ± 38.1	60.1 ± 55.0	97.5 ± 50.4	95.8 ± 32.8	54.9 ± 52.9	48.8 ± 44.6	60.1 ± 57.0	54.7 ± 49.3
Ⅱ-10	91.8 ± 36.6	62.2 ± 50.9	97.4 ± 49.8	95.2 ± 26.3	53.6 ± 48.3	46.0 ± 40.0	56.4 ± 45.5	51.3 ± 45.4
Ⅱ-11	89.2 ± 40.2	68.2 ± 63.9	95.2 ± 52.8	93.3 ± 35.3	55.3 ± 59.4	54.0 ± 51.5	61.8 ± 70.0	57.9 ± 54.7
Ⅱ-12	83.2 ± 26.7	50.3 ± 38.5	94.3 ± 25.4	91.9 ± 22.2	51.3 ± 39.2	42.4 ± 30.1	53.6 ± 38.4	48.1 ± 36.3
Ⅱ-13	86.9 ± 35.4	61.8 ± 49.6	95.9 ± 40.1	92.2 ± 26.2	52.9 ± 44.1	45.1 ± 39.8	55.8 ± 42.7	50.5 ± 40.5
Ⅱ-14	84.4 ± 36.4	59.5 ± 50.8	94.7 ± 41.9	93.4 ± 34.4	53.4 ± 49.4	53.5 ± 49.8	62.0 ± 57.8	57.8 ± 50.8
Ⅱ-15	88.6 ± 27.8	64.4 ± 48.6	96.3 ± 38.7	95.0 ± 28.1	55.3 ± 47.1	56.7 ± 49.6	66.7 ± 53.9	61.9 ± 48.0
Ⅱ-16	85.4 ± 29.5	61.6 ± 48.2	95.8 ± 35.6	94.6 ± 31.7	54.1 ± 46.8	46.8 ± 38.8	58.9 ± 45.6	52.9 ± 39.4
处理-州市 Treatment- prefecture	穗长 Spike length	1~2 节长 1~2 node length	穗颈长 Peduncle length	穗下节长 Node length under spike	有效穗 Effective panicles	实粒数 Full grains /spike	秕粒数 Blighted grains/spike	穗重 Spike weight
Ⅱ-1	89.5 ± 26.0	90.7 ± 50.4	91.8 ± 29.2	89.7 ± 36.5	50.8 ± 36.2	30.1 ± 18.7	165.8 ± 29.7	36.1 ± 28.2
Ⅱ-2	90.6 ± 29.6	91.4 ± 52.8	89.5 ± 34.6	93.1 ± 40.6	51.4 ± 37.6	33.3 ± 24.8	130.0 ± 24.9	34.7 ± 27.7
Ⅱ-3	92.8 ± 29.4	92.1 ± 55.7	90.7 ± 63.1	91.6 ± 45.3	50.9 ± 38.6	31.5 ± 24.9	156.4 ± 32.1	36.2 ± 30.3
Ⅱ-4	91.4 ± 30.7	92.2 ± 58.6	94.3 ± 35.4	92.5 ± 43.6	51.4 ± 39.0	35.5 ± 28.7	128.4 ± 30.3	34.1 ± 29.5
Ⅱ-5	96.8 ± 49.2	97.2 ± 69.6	97.2 ± 48.2	96.2 ± 56.6	54.1 ± 51.1	37.2 ± 38.4	133.1 ± 39.8	50.1 ± 55.1
Ⅱ-6	94.7 ± 49.0	96.8 ± 71.2	95.5 ± 51.1	97.5 ± 57.8	56.9 ± 49.8	38.6 ± 42.8	137.5 ± 48.8	54.3 ± 49.8
Ⅱ-7	96.6 ± 46.0	93.1 ± 64.6	93.1 ± 42.6	93.3 ± 52.5	60.4 ± 55.1	32.6 ± 29.2	160.2 ± 50.4	48.4 ± 43.2
Ⅱ-8	96.5 ± 33.1	95.2 ± 62.0	98.0 ± 36.5	91.7 ± 43.8	55.9 ± 44.8	33.3 ± 28.0	125.7 ± 34.0	56.2 ± 48.2
Ⅱ-9	96.1 ± 42.9	96.7 ± 64.7	97.5 ± 44.0	95.1 ± 55.7	52.7 ± 44.9	35.6 ± 34.6	160.3 ± 62.6	42.8 ± 43.8
Ⅱ-10	94.3 ± 38.2	95.7 ± 57.7	96.0 ± 42.9	93.7 ± 50.8	59.2 ± 49.4	34.4 ± 28.7	51.6 ± 54.6	39.0 ± 35.2
Ⅱ-11	97.5 ± 44.1	94.1 ± 66.4	98.7 ± 49.2	92.4 ± 57.0	62.0 ± 56.2	38.1 ± 43.2	131.2 ± 56.7	52.7 ± 62.2
Ⅱ-12	91.8 ± 27.7	91.6 ± 48.7	92.4 ± 37.7	90.3 ± 37.9	51.6 ± 41.3	32.3 ± 21.0	170.9 ± 45.2	34.6 ± 29.5
Ⅱ-13	95.3 ± 37.5	94.5 ± 60.1	96.9 ± 43.6	92.6 ± 49.3	61.3 ± 52.0	31.1 ± 25.1	163.2 ± 58.5	37.4 ± 32.7
Ⅱ-14	96.2 ± 47.0	93.2 ± 64.7	95.7 ± 47.9	93.4 ± 55.2	57.7 ± 49.3	37.1 ± 35.8	150.4 ± 59.5	53.5 ± 55.5
Ⅱ-15	97.4 ± 38.2	95.0 ± 58.7	98.6 ± 42.8	91.9 ± 48.9	53.2 ± 43.8	33.4 ± 27.6	131.5 ± 44.1	58.3 ± 52.1
Ⅱ-16	95.5 ± 35.5	92.8 ± 59.4	97.4 ± 44.0	91.2 ± 46.2	58.0 ± 45.9	35.7 ± 30.4	126.3 ± 43.3	40.2 ± 32.7

1:昆明,2:昭通,3:曲靖,4:玉溪,5:思茅,6:临沧,7:保山,8:丽江,9:文山,10:红河,11:西双版纳,12:楚雄,13:大理,14:德宏,15:怒江,16:迪庆 1: Kunming,2: Zhaotong,3: Qujiu,4: Yuxi, 5: Simao,6: Lincang,7: Baoshan,8: Lijiang, 9: Wenshan,10: Honghe,11: Xishuangbanna, 12: Chuxiong,13: Dali,14: Dehong,15: Nujiang,16: Diqing

2.2 云南稻核心种质磷高效的地带性特征

图 1~图 3 清晰的显示了聚类的全过程:首先将 548 份云南核心种质 16 个性状相关数据,按 16 个州市间将亲疏程度最近两类合并成一类,再与其它亲疏程度较近的合并,多次重复这一过程,最终将所有数据都合并

为一类;据变量间距离按比例调整到 0~25 范围内,选定适当的分类距离值,垂直尺标线与相交点的水平连线即为对应的类别数。用 SPSS11.5 软件对 16 个州市核心种质 16 个性状磷高效相对指标的平均值和变异系数数据聚类分析见图 1:当选择标尺值 16 时将聚类图分成 3 个区域,即 I 区以横断山区谷地、乌蒙山、哀牢山和珠江、长江、澜沧江、怒江、红河共五江河上游为主体形成由曲靖、丽江、大理、楚雄、怒江、昭通共 6 个州市组成的稻种磷高效特征;曲靖以乌蒙山、梁子山为主和境内南盘江水系,丽江以玉龙雪山、老君山为主和境内有金沙江水系,大理白族自治州地处滇西横断山区和金沙江、澜沧江、怒江、红河四大水系,楚雄境内有乌蒙山、哀牢山和百草岭三山以及金沙江、元江两大水系,怒江由横断山脉纵谷地带与怒江、澜沧江、金沙江形成的三江并流,昭通属典型的高原山地构造地形和金沙江、牛栏江等 7 条主要江河。II 区以横断山、高黎贡山、哀牢山、乌蒙山和澜沧江、伊洛瓦底江、红河、怒江、珠江 5 大江河流域为主体形成由西双版纳、德宏、文山、红河、思茅、保山、玉溪、昆明和临沧共 9 个州市组成稻种资源磷高效特征:西双版纳傣族自治州以横断山脉和澜沧江为主,德宏景颇族自治州境内有高黎贡山西南段和伊洛瓦底江的支流瑞丽江、大盈江两条水系,文山壮族布依族自治州典型的岩溶石山区和珠江、红河两大流域的分水岭地区,红河哈尼族彝族自治州以哀牢山为主和珠江、红河两大水系;思茅位于哀牢山以西、境内有横断山脉南段中山峡谷地区的无量山和澜沧江水系,保山境内有高黎贡山和怒江、澜沧江和伊洛瓦底江三大水系;玉溪位于哀牢山、梁王山之间和境内有珠江和红河两大水系,昆明市位于川西鲁南山脉的拱王山系和滇东北乌蒙山脉的梁王山系以及金沙江(长江上游)、南盘江(珠江上游)、元江(红河上游)三大水系;临沧属横断山系怒山山脉的南延部分和境内有澜沧江、怒江两大水系。III 区迪庆属青藏高原南延、横断山脉西南腹地和金沙江、澜沧江、怒江和伊洛瓦底江四大江的上游形成迪庆州稻种资源特有磷高效类型特征。

2.3 低有效磷胁迫下云南稻核心种质氮高效的地带性特征

在图 2 中选择标尺值 10,即可将云南省 16 个州市核心种质的平均 16 个性状氮肥效应相对指标的平均值和变异系数聚类图分成 3 个区域,即 I 区以横断山区、高原山地和长江、珠江、红河、澜沧江、怒江和伊洛瓦底江共 6 条亚洲著名的江河上游为主形成丽江、怒江、迪庆、昭通、玉溪、曲靖、大理、昆明和楚雄共 9 个州市组成稻种氮高效特征。II 区由思茅、西双版纳、文山、德宏、保山和临沧共 6 个州市形成云南稻种多样性中心区稻种氮高效特征,这与图 3 清晰显示了州市缺磷土壤、稻作区海拔分布、气温和降雨量等生态因子聚类组成的 5 个州市同一类型相符;同时以横断山、高黎贡山、岩溶石山和澜沧江、怒江、伊洛瓦底江三大水系为主体形成云南稻种资源遗传多样性中心和稻种氮高效共同特征。III 区为红河哈尼族彝族自治州以哀牢山为主和珠江、红河两大水系。

3 讨论

3.1 低有效磷胁迫下云南稻核心种质形态性状生态差异磷效应明显高于氮效应

云南土壤中有效磷 $<6\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 水田 $>50\%$,几乎耕地均需补给氮素;低有效磷胁迫下云南稻核心种质不施肥对施氮肥 16 个州市间形态性状的氮效应差异明显的 8 个相对指标(茎蘖数、秆重、生物产量、根重、全株重、有效穗数和实粒数)为 $30.1\% \sim 66.7\%$,其余 7 个相对指标氮效应不明显($81.5\% \sim 99.5\%$);云南稻核心种质不施肥(无效磷)对施磷肥 16 个州市间形态性状的磷效应差异明显高于氮效应,即磷效应明显的有 6 个相对指标(茎蘖数、秆重、生物产量、根重、全株重、穗重)为 $32.5\% \sim 80.0\%$ 和极明显效应的 8 个相对指标为 $21.9\% \sim 291.0\%$,仅有穗长和 1~2 节长相对指标磷效应不明显($82.2\% \sim 123.4\%$)。另外,SPSS 显著性检验结实茎蘖数、秆重、生物产量、根重、全株重和穗重共 6 个相对指标既是云南稻核心种质磷高效和氮高效基因型间筛选的理想指标,又能反映州市间核心种质氮磷高效的地带性差异;该指标更全面并从前人研究结果相互验证,即低磷胁迫下水稻施磷肥能显著增加生物产量和籽粒产量^[23],水稻氮磷高效鉴定形态指标与抗旱指标^[24]相似;施尿素能显著影响红壤磷变化,导致土壤 pH 增加^[25];缺氮促进根系生长,增加根冠比^[16]。

3.2 云南稻核心种质磷高效基因型的地带性特征与山脉水系、土壤肥力、生态因子和遗传多样性有关

云南稻 16 个州市核心种质磷高效的地带性可分为 3 个区域: I 区以横断山区谷地、乌蒙山、哀牢山和五

江河上游为主形成由曲靖、丽江、大理、楚雄、怒江、昭通共 6 个州市组成的稻种磷高效相似的地带性特征;这些州市在西南和东南两支暖湿气流影响下雨量集中,6~8 月份雨量占全年雨量 65%,也是非点源污染物氮磷流失的主要时期。Ⅱ区以横断山、高黎贡山、哀牢山、乌蒙山和 5 大江河流域为主体形成由西双版纳、德宏、文山、红河、思茅、保山、玉溪、昆明和临沧共 9 个州市组成稻种资源磷高效相似的地带性特征;Ⅲ区迪庆属青藏高原南延、横断山脉西南腹地和四大江的上游形成迪庆州稻种资源特有磷高效类型特征。因此,云南稻核心种质磷高效的地带性与山脉水系、土壤肥力、生态因子和遗传多样性有关;究其原因在于:(1)云南稻种资源的多样性与生态复杂性和土壤类型的多样性相关;(2)水稻地方品种不仅是云南野生稻经过成千上万年进化形成的,也是云南数十年乃至上万年生态环境变迁的活化石和信息库;(3)云南土壤在降雨冲刷下增加了吸附态氮和磷的流失量,导致土地贫瘠和地表水富营养化日益明显,而贫瘠的酸性红壤形成了丰富的氮磷高效基因源;(4)思茅、西双版纳、文山、德宏和临沧共 5 个州市云南稻种资源的遗传多样性中心区^[10]相对集中于Ⅱ区。

3.3 低有效磷胁迫下云南稻核心种质氮高效的地带性特征也与山脉水系、土壤肥力、生态因子和遗传多样性有关

以聚类分析为主综合考虑山脉水系、土壤肥力和生态因子等因素,将云南稻 16 个州市核心种质氮效应的地带性分为 3 个区域:Ⅰ区以横断山区、高原山地和 6 条亚洲著名的江河上游为主形成丽江、怒江、迪庆、昭通、玉溪、曲靖、大理、昆明和楚雄共 9 个州市组成稻种氮高效相似的地带性特征。Ⅱ区以横断山、高黎贡山、岩溶石山和澜沧江、怒江、伊洛瓦底江三大水系为主体形成的由思茅、西双版纳、文山、德宏、保山和临沧共 6 个州市形成云南稻种多样性中心区^[10]稻种氮高效相似的地带性特征,这与缺磷土壤、稻作区生态因子聚类组成的区域相符。Ⅲ区为红河哈尼族彝族自治州以哀牢山为主和珠江、红河两大水系;哈尼梯田湿地分布于海拔 144~2000m、坡度在 15~75°的山坡上,具有独特的垂直特征^[26];云南省境内怒江和澜沧江下游区是中国吸附态氮流失的重点区域之一^[27],而这些区域是云南稻种资源遗传多样中心区,并拥有稻种资源氮磷高效共有特征。

References:

- [1] Zeng Y W, Li S C, PU X Y, *et al.* Eco-geographic difference and cold tolerance at seeding stage of core collection for rice in Yunnan. *Ecology and Environment*, 2006, 15(2): 345—349.
- [2] Evenson R, Gollin D. Assessing the impact of green revolution, 1960~2000. *Science*, 2003, 300: 758—762.
- [3] China Statistical Bureau. *China Statistical Yearbook 2003—2004*. Beijing: China State Statistical Press, 2004.
- [4] Wang J N, Yan W J, Jia X D, *et al.* Modeling the export of point sources of nutrients from the Yangtze River basin and discussing countermeasures. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(4): 658—666.
- [5] Li X D, Sun T H, Li H B, *et al.* Current researches and prospects of phosphorus removal in constructed wetland. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(3): 1226—1232.
- [6] Bai J H, Ou Y H, Den W, *et al.* A review on nitrogen transmission processes in natural wetlands. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(2): 326—333.
- [7] Fang B, Wang G H, Lü C H, *et al.* Research on harmonious growth of eco-economy and agricultural N input. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(1): 214—219.
- [8] Feng R Z, Yao T, Zhou W H, *et al.* Studies on the interactions between phosphate-solubilizing bacteria and nitrogen-fixing bacteria in rock phosphate solubilization. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8): 2764—2769.
- [9] Londo J P, Chiang Y C, Hung K H, *et al.* Phylogeography of Asian wild rice, *Oryza rufipogon*, reveals multiple independent domestications of cultivated rice, *Oryza sativa*. *PNAS*, 2006, 103(25): 9578—9583.
- [10] Zhang H L, Sun J L, Wang M X, *et al.* Genetic structure and phylogeography of rice landraces in Yunnan, China revealed by SSR. *Genome*, 2007, 51(1): 72—83.
- [11] Shen X P, Shen M X, Gu L, *et al.* Assessment on superficial heredity of late Japonica rice local germplasm resources in Taihu Lake area. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(1): 189—196.

- [12] Lang N T, Buu B C. Mapping QTLs for phosphorus deficiency tolerance in rice (*Oryza sativa*. L). *Omonrice*, 2006,14:1—9.
- [13] Yi K K, Wu Z C, Zhou J, *et al.* *OsPTF1*, A novel transcription factor involved in tolerance to phosphate starvation in rice. *Plant Physiology*, 2005,138:2087—2096.
- [14] Duan Y H, Zhang Y L, Wang S W, *et al.* Enhancement effect by nitrate on rice plant during the whole growth period and its physiological mechanisms. *Acta Ecologica Sinica*, 2007,27(3): 1086—1092.
- [15] Yan X L, Wu P, Ling H Q, *et al.* Plant Nutriomics in China: An Overview. *Annals of Botany*, 2006,98: 473—482.
- [16] Li B Z, Xin W J, Xu G H. Physiological mechanisms in uptake and use of different forms of nitrogen by nitrogen starved rice crop. *Acta Pedologica Sinica*, 2007,44(2): 273—279.
- [17] Cao N, Chen X P, Zhang F S, *et al.* Prediction of phosphate fertilizer demand in China based on change in soil phosphate fertility. *Acta Perologica Sinica*, 2007,44 (3): 536—543.
- [18] Du J, Zeng Y W, Zhang Y S, *et al.* Relation between ability of tolerance to low phosphorus and Indica-Japonica of core collection of rice landraces in Yunnan Province. *Ecology and Environment*, 2007,16(1):135—139.
- [19] Zeng Y W, Liu J F, Wang L X, *et al.* Ecogeographic difference and variation pattern of mineral contents for Yunnan rice landraces. *Acta Agronomica Sinica*, 2006,32(8): 1166—1173.
- [20] Zeng Y W, Shen S Q, Li Z C, *et al.* Ecogeographic and genetic diversity based on morphological characters of indigenous rice (*Oryza sativa* L.) in Yunnan, China. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 2003,50(7): 566—577.
- [21] Zeng YW, Zhang H L, Li Z C, *et al.* Evaluation of genetic diversity in the rice landraces(*Oryza sativa* L.) in Yunnan, China. *Breeding Science*, 2007, 57(2): 91—99.
- [22] Zeng Y W, Li S C, Shen S Q, *et al.* Geographical distribution and cold tolerance at booting stage of the second core collection of rice landraces (*Oryza sativa*) from Yunnan, China. *Plant Genetic Resources Newsletter*, 2005,143: 51—55.
- [23] Fageria N K, Filho M P B. Dry-matter and grain yield, nutrient uptake, and phosphorus use-efficiency of lowland rice as influenced by phosphorus fertilization. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2007,38:1289—1297.
- [24] Cheng J F, Pan X Y, Liu Y B, *et al.* Morphological indexes of drought resistance identification in rice. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(11): 3117—3125.
- [25] Du Z Y, Zhou J M, Wang H Y, *et al.* Effect of nitrogen fertilizers on movement and transformation of phosphorus in an acid soil. *Pedosphere*, 2005, 15(4):424—431.
- [26] Yao M, Cui B S. The vertical characteristics of ecosystem of Hani's terrace paddy field in Yunnan, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2006,26(7): 2115—2124.
- [27] Yang S T, Cheng H G, Hao F H, *et al.* Study on partitioned and graded system of non-point source pollution in China. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(3): 398—403.

中文参考文献:

- [1] 曾亚文,李坤崇,普晓英,等. 云南稻核心种质苗期耐冷性及其地理生态差异. *生态环境*, 2006,15(2):345—349.
- [3] 中国统计局. 中国统计年鉴 2003~2004. 北京:中国统计出版社,2004.
- [4] 王佳宁,晏维金,贾晓栋,等. 长江流域点源氮磷营养盐的排放、模型及预测. *环境科学学报*, 2006,26(4):658~666.
- [5] 李晓东,孙铁珩,李海波,等. 人工湿地除磷研究进展. *生态学报*, 2007,27(3): 1226~1232.
- [6] 白军红,欧阳华,邓伟,等. 湿地氮素传输过程研究进展. *生态学报*, 2005, 25(2):326~333.
- [7] 方斌,王光火,吕昌河. 农业 N 肥投入与生态经济效益的协调增长. *生态学报*, 2007, 27(1): 214~219.
- [8] 冯瑞章,姚拓,周万海,等. 溶磷菌和固氮菌溶解磷矿粉时的互作效应. *生态学报*, 2006, 26(8):2764~2769.
- [11] 沈新平,沈明星,顾丽,等. 太湖流域晚粳稻地方种资源的表型遗传多样性. *生态学报*, 2007,27(1): 189~196.
- [14] 段英华,张亚丽,王松伟,等. 不同氮效率水稻全生育期内对增硝营养的响应及其生理机制. *生态学报*, 2007,27(3): 1086~1092.
- [15] 杜娟,曾亚文,张云孙,等. 云南稻核心种质耐低磷性状与籼粳亚种间的关系. *生态环境*, 2007,16(1):135~139.
- [16] 李宝珍,辛伟杰,徐国华. 氮饥饿水稻利用不同形态氮素的差异及其生理机制. *土壤学报*, 2007,44(2):273~279.
- [17] 曹宁,陈新平,张福锁,等. 从土壤肥力变化预测中国未来磷肥需求. *土壤学报*, 2007,44(3):536~543.
- [23] 程建峰,潘晓云,刘宜,等. 水稻抗旱性鉴定的形态指标. *生态学报*, 2005,25(11):3117~3125.
- [26] 姚敏,崔保山. 哈尼梯田湿地生态系统的垂直特征. *生态学报*, 2006,26(7):2115~2124.
- [27] 杨胜天,程红光,郝芳华,等. 全国非点源污染分区分级. *环境科学学报*, 2006, 26(3): 398~403.