

云南断陷盆地典型种植模式资源利用效率分析

邹志刚^{1,2,3}, 张浩^{1,3}, 曾昭霞^{1,3}, 张建云⁴, 赵杰军⁴, 包松莲⁴, 张辰^{1,2,3}, 曾馥平^{1,3}

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室, 湖南 长沙 410125;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 广西 环江 547100;

4. 中国林业科学研究院资源昆虫研究所, 云南 昆明 650224)

[摘要]近年来随着云南特色产业的快速发展, 断陷盆地喀斯特地区出现了万寿菊、柑橘、桃、梨、苹果、石榴等大规模种植园, 为探明其生态适应性及经济实用性, 在蒙自市、泸西县及建水县设置研究样地, 分析比较各模式的养分特征及资源利用效率。结果表明, 相对于传统的玉米种植模式, 其他模式的土壤养分含量更高, 但也需要进行适当的养分调整, 例如各模式均受到较明显的 N 限制 ($N:P >> 14$), 柑橘和苹果模式土壤速效钾含量偏低。同时, 虽然仅石榴和万寿菊模式对光、热、水的利用效率优于玉米模式, 但各模式的土地生产率相对于传统玉米模式均有 17% 以上的提升。可见, 石榴、苹果等模式适宜在云南断陷盆地地区发展, 可通过优化肥力投入结构、添加林下作物等进一步提升各模式的生态、经济效益。

[关键词] 资源利用效率; 石榴; 万寿菊; 断陷盆地

[中图分类号] F326.1 **[文献标识码]** A

农业资源是指农业生产中可利用的光、热、水、土、肥、气及其他生产要素与生命物质组成的耦合整体(朱鹤健 & 何绍福, 2003)。光能利用率是指植物将所吸收的光合有效辐射转化为有机碳的效率, 是衡量地区生产潜力水平的重要指标。不同的种植模式可以通过调整作物冠层光合有效辐射的垂直分布从而影响其光能利用效率(Zhang et al., 2016)。热量资源决定了地区的作物种类, 品种熟性和种植制度, 在很大程度上也决定了该地区的农业措施。在一定温度范围内, 气温与作物发育进程成正相关, 只有当温度累积到一定程度时, 作物才会进入下一个生育期(Craufurd et al., 2009)。水分利用效率反映了植物耗水与干物质生产之间的直接关系(Niu et al., 2011)。合理的种植模式和农艺措施可以提高植物水分利用效率(王会肖等, 2000; 王建林等, 2007)。如甘肃省、辽宁省推行的旱作双垄全膜覆盖集雨沟播集成技术模式; 优化灌溉量及灌溉时间等均可以抑制蒸发, 提高作物对水分的吸收利用(王红丽等, 2019; Xu et al., 2016)。耕作方式如深耕也可以显著影响作物的水分利用效率(Liu et al., 2013; 赵亚丽等, 2014)。肥料的施用对粮食产量的提升具有重要作用。张福锁等(2000)研究发现目前我国粮食生产施肥为高投入、中产出和低资源效率。国内外研究表明, 管理措施影响着植物对肥料的利用效率, 如分期施肥、合理配肥比一次性施肥更利于小麦吸收利用(夏晓亮等, 2010; Duan et al., 2014)。虽然资源利用效率分析作为生产评价中的重要一环, 在多个国家的多个领域均得到了广泛应用和发展, 但是目前对于植物的资源利用效率研究主要针对各地区的粮食作物, 对喀斯特地区的种植模式研究较少。

自 1958 年, 哈佛大学的 A.Redfield 首次证明海洋浮游生物的 C、N、P 有特定的组成, 并在海洋环境和生物相互作用中不断调节(Redfield, 1958)后, 各国学者不断应用和拓展着生态化学计量理论(Elser 和 Hassett (1994) 以及 Elser 等(2000))。这一理论认为生物体内各元素比例相对稳定, 并随生长发育过程、环境适应过程等发生变化, 即生物具有在变化的环境中利用内稳态机制保持化学组成相对恒定的能力。在植物个体水平上, C、N、P 的相互作用及与外界环境的关系作为一个整体, 共同决定着植物的营养水平和生长发育过程(Bazzaz, 1998; Güsewell, 2004); 进而决定了生态系统中植物与环境的主要交互过程, 如能量流动和物质循环(Aerts & Chapin, 2000; Moe et al., 2005)。因此, 无论是植物个体水平, 还是生态系统水平, C、N、P 都是相互作用的。研究其中一个元素在生态学过程中的作用, 必须同时考虑其他元素的影响。

云南省拥石漠化土地面积为 235.2hm², 占据了全国石漠化总面积的 23.45%。潜在石漠化面积 204.2hm²。区域人口密度达 207 人/km², 是全国平均人口密度的 1.5 倍, 是岩溶地区理论最大可承载人口密度的(100 人/km²)的两倍多。评估农业资源利用效率能为发展可持农业生产模式提供数据指引。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于云南省红河哈尼族彝族自治州(以下简称红河州)建水县、泸西县、蒙自市 3 个典型石漠化综合治理示范区(图 1)。根据统计年鉴和 2016 年初步的实地调查, 每个

[收稿日期] 2021-02-22

[作者简介] 邹志刚(1995—), 男, 湖北公安人, 硕士研究生, 主要从事喀斯特生态系统的生态服务功能评价等相关工作。

[通讯作者] 曾馥平(1964—), 男, 湖北天门人, 主要从事喀斯特生态恢复相关的科研与扶贫工作。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

地点选择了两种典型的种植模式。柑橘和石榴位于建水县, 海拔 230 ~ 2515 m, 年平均气温 19.4℃。年平均日照时数为 2047.9 h, 年平均降雨量为 1045.5 mm。梨和桃位于泸西县, 海拔 820 ~ 2459 m, 年平均气温 16.0℃。平均日照时数 1951.1 h, 年平均降雨量 1028.1 mm。苹果和万寿菊位于蒙自市, 海拔 146 ~ 2567.8 m, 年平均气温 19.0℃。平均日照时数为 2228.3 h, 年平均降雨量为 1377.1 mm。近年来, 在政府扶贫政策的支持下, 随着石漠化三期综合治理工程的推进, 各种果树种植在红河州地区得到了长足的发展。

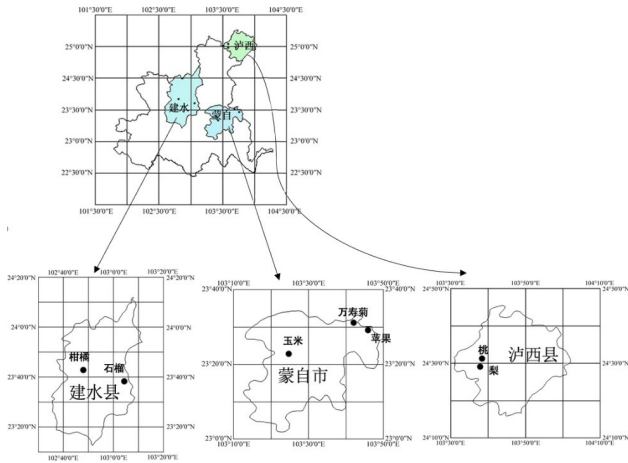


图 1 研究区位置

1.2 各典型种植模式概况

2016 年云南统计年鉴显示, 玉米种植面积约 151.7 万 hm^2 , 占全省粮食种植面积的 21%。农民直接在喀斯特土壤上种植玉米, 每年 7 ~ 8 月收获。蒙自市从 2013 年开始开发万寿菊产业, 如今已经形成了完整产业链。万寿菊种植当年就能收获, 每年 8、9 月份是采摘期, 可以采摘两到三茬。建水县 1986 年已经成为云南省柑橘商品基地县, 发展至今已经形成了完善的柑橘生产产业链。柑橘种植时定植坑内施农家肥, 保证早期养分供给; 定植完成后主要施用氮肥, 3 年后开始结果, 5 年左右产量逐渐稳定。规模化桃树种植在泸西县已经有十几年的历史, 已经成为仅次于梨模式的第二大水果产业。泸西县也被列为国家桃产业技术体系示范县。苹果主要种植在蒙自市西北乐镇、新安所镇和老寨苗乡, 总种植面积达 6000 hm^2 。当地出产的苹果含糖量高达 17% ~ 20%, 是我国西南地区最甜的苹果之一。苹果树在第 5 年开始进入成熟期, 一些早熟品种在 7 月初开始成熟, 而晚熟品种在 9 月初开始成熟。2017 年, 蒙自市的梨园面积约 3000 hm^2 , 占整个蒙自市果园面积的一半。高原梨生长期约 45 天, 比北方品种短, 在果品市场具有潜在优势。梨树种植 5 年后, 进入成熟期, 高原梨树每年 7 ~ 8 月采收。2017 年, 石榴种植面积约 8000 hm^2 , 占蒙自市果园面积的 48%。近年来, 石榴以其果形好、成熟早的特点占领了当地市场。石榴树在种植 10 年后开始结果, 每年 7 ~ 8 月收获。

1.3 数据收集和样品分析

1.3.1 数据收集。气温、降雨量、日照时数等气象数据由蒙自市、

泸西县、建水县气象观测站提供; 辐射数据来自于蒙自市气象辐射观测站。产量数据是针对每种模式随机选取 3 ~ 5 户农户进行问卷调查得到的。

1.3.2 取样分析数据。对应如上典型种植样地, 每个样地随机选取 3 个 50m × 50m 的样方, 每个样方按“S”形选择 5 株植物进行对应取样。每个样本组包括叶片、凋落物和土壤样本。每个样地随机挖取两个 0 ~ 50cm 土壤剖面取得土壤混合样。

土壤 pH 采用电极电位法、有机质 (SOC) 采用重铬酸钾氧化—外加加热法、全氮 (TN) 采用半微量开氏法—流动注射仪法测定、全磷 (TP) 采用 NaOH 熔融—钼锑抗显色—紫外分光光度法、全钾 (TK) 采用 NaOH 熔融—原子吸收法、碱解氮 (AN) 采用碱解—扩散法、速效磷 (AP) 采用 0.5 mol · L⁻¹ NaHCO₃ 提取—钼锑抗显色—紫外分光光度法、速效钾 (AK) 采用 NH₄Ac 浸提—原子吸收法。全氮和全磷用 H₂SO₄ 消化后, 分别用靛酚蓝比色法和 Mo—Sb 比色法测量; 全钾用酸溶解 ICP 发射光谱法测定; 总有机碳含量用 K₂Cr₂O₇ 滴定法测量。

1.4 数据分析

1.4.1 光能利用率。光能利用率是指单位面积上, 作物通过光合作用产生的有机物中贮存的能量与接收到的太阳能的比值; 其计算公式为:

$$E = \frac{MT}{SQ} = T \cdot M \cdot 10^3 / Q \quad (1)$$

式中: E 为光能利用率; M 为农作物干物质质量 (kg/ha⁻²); Q 为年均辐射总量 (kJ/ha⁻²); T 为燃烧 1 g 干物质释放的能量, 取 18.06605 kJ · g⁻¹。

1.4.2 热量利用效率。热量利用效率可以衡量气温对作物生产的贡献率, 一般用有效积温衡量; 其计算公式为:

$$F = Y / \sum T \quad (2)$$

式中: F 为热量利用效率, 即大于 10℃ 的积温每 10℃ 在单位面积上获得的作物或林果产量 (kg · hm⁻² · °C⁻¹); Y 为作物或林果产量 (kg · hm⁻²); T 为作物或林果生长期内大于 10℃ 的积温。

1.4.3 水分利用率。水分利用率可以反映出作物生长时降雨量对作物需水量的满足程度; 其计算公式为:

$$W = Y / P \quad (3)$$

式中: W 为水分利用效率; Y 为作物或林果产量 (kg · hm⁻²); P 为年均降雨量 (mm)。

1.4.4 土地生产率。土地生产率是综合衡量土地的生产能力的指标; 其计算公式为:

$$R = \sum (YC) \quad (4)$$

式中: R 为土地生产率; Y 为作物或林果产量 (kg · hm⁻²); C 为年均价格 (yuan/kg)。

2 结果

2.1 断陷盆地喀斯特区典型模式的土壤养分特征

从图 2 可以看出, 七种模式中, 梨模式的速效磷含量最

高,其次是苹果,这两种模式的速效磷含量远高于其他模式;桃和石榴模式的土壤速效磷含量基本相同,玉米模式含量最低,仅为梨模式的 1.9%。石榴模式的土壤碱解氮含量最高,达到 $614.15 \pm 68.76 \text{ mg/kg}$,为含量最低的玉米模式的 7.05 倍;剩余各模式从高到低依次为万寿菊、苹果、柑橘、梨、桃。与速效磷、碱解氮的情况不同,各模式土壤中速效钾含量的差异明显更小;石榴模式含量最高,但仅比第二位的桃模式高 4.2%,也仅为含量最低的玉米模式的 3.41 倍。

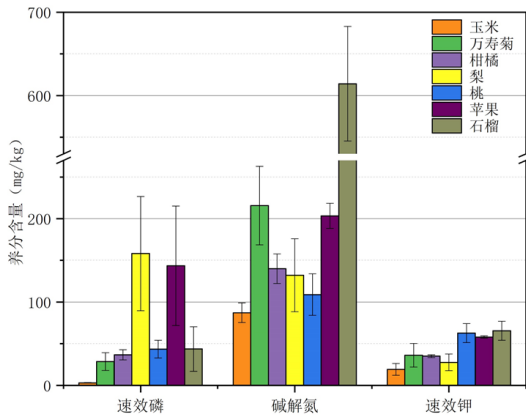


图 2 不同种植模式速效磷、碱解氮、速效钾含量
注:数据为平均值 ± 标准误

与速效养分相反,各模式土壤全磷含量差异较小(图 3)。苹果模式含量最高为 $3.35 \pm 0.30 \text{ g/kg}$,为含量最低的石榴模式的 2.8 倍,梨和桃模式差距较小(7.5%),约为 1 g/kg 。苹果模式的土壤全氮含量也是最高,为 $2.23 \pm 0.48 \text{ g/kg}$,玉米模式最低为 $0.93 \pm 0.12 \text{ g/kg}$,梨模式与玉米模式接近为 $0.94 \pm 0.1 \text{ g/kg}$ 。各模式土壤全钾含量差异显著,玉米、桃、苹果模式均超过了 7.5 g/kg ,而含量最低的石榴模式仅为 0.47 g/kg 。与全磷、全氮不同,玉米模式的土壤全钾含量达到 8.59 g/kg ,仅次于桃模式。苹果模式的土壤有机质含量在七种模式中含量最高,达到 $33.49 \pm 2.98 \text{ g/kg}$,万寿菊模式与柑橘模式表现接近(4.1%),分别为 $28.22 \pm 4.2 \text{ g/kg}$ 、 $27.12 \pm 3.19 \text{ g/kg}$ 。石榴模式土壤全氮含量最低为 $12.09 \pm 1.52 \text{ g/kg}$ 。

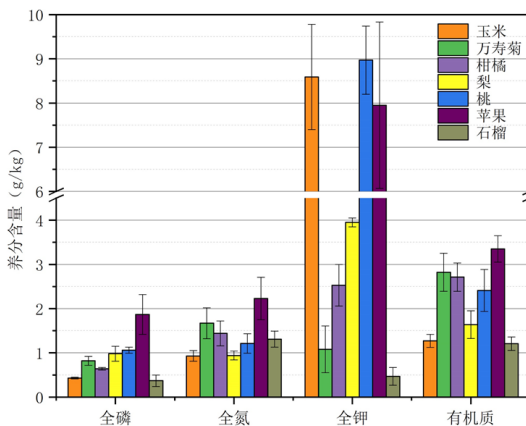


图 3 不同种植模式全磷、全氮、全钾及有机质含量
注:数据为平均值 ± 标准误,有机质含量 = 图示含量 *10。

2.2 断陷盆地喀斯特区典型模式的土壤养分化学计量

表 1 不同模式的碳氮比、碳磷比、氮磷比

	C: N	C: P	N: P
玉米	$13.93 \pm 2.79 \text{ bc}$	$29.38 \pm 3.7 \text{ bce}$	$2.14 \pm 0.27 \text{ bc}$
万寿菊	$16.05 \pm 1.91 \text{ ab}$	$33.99 \pm 3.22 \text{ ab}$	$2.03 \pm 0.24 \text{ bcd}$
柑橘	$19.17 \pm 2.43 \text{ ab}$	$42.22 \pm 4.80 \text{ a}$	$2.24 \pm 0.41 \text{ b}$
梨	$17.67 \pm 3.94 \text{ ab}$	$17.14 \pm 3.90 \text{ d}$	$0.98 \pm 0.19 \text{ e}$
桃	$20.31 \pm 4.46 \text{ a}$	$22.69 \pm 4.33 \text{ cd}$	$1.14 \pm 0.18 \text{ de}$
苹果	$15.43 \pm 2.42 \text{ ab}$	$18.93 \pm 5.43 \text{ cd}$	$1.28 \pm 0.48 \text{ cde}$
石榴	$9.30 \pm 1.11 \text{ c}$	$36.07 \pm 3.90 \text{ ab}$	$3.74 \pm 1.19 \text{ a}$

注:数据为均值 ± 标准误,不同小写字母表示不同土地利用方式差异显著 ($P < 0.05$)。

从表 1 可以看出桃模式的土壤 C:N 值最高为 20.31 ± 4.46 ,但是与万寿菊、柑橘、梨、苹果的差异不显著;而石榴模式土壤 C:N 比最低,为 9.30 ± 1.11 ,低于传统的玉米种植模式的 13.93 ± 2.79 。与 C:N 比表现不同,柑橘模式土壤 C:P 值最高,达到 42.22 ± 4.80 ,与传统玉米模式差异显著。梨模式的 C:P 比最低,仅为 17.14 ± 3.90 。石榴模式土壤 N:P 最高,为 3.74 ± 1.19 ,为 N:P 比值最低的梨模式的 3.8 倍。玉米、万寿菊、柑橘模式的 N:P 差异不显著,分别为 2.14、2.03、2.24,同样桃和苹果模式表现也相似,分别为 1.14、3.74。

2.3 断陷盆地喀斯特区典型模式的资源利用特征

各模式对光能的利用效率各不相同,苹果模式对光能的利用效率最差仅为 0.05,是传统玉米种植模式的 19.23%,柑橘模式表现也仅为玉米模式的 34.62%。梨和桃模式表现相当,分别为 0.20 和 0.19,约为玉米模式的 73% (表 2)。石榴模式和万寿菊模式对光的利用效率明显优于传统玉米模式,分别为 0.44 和 0.30,超过玉米模式 69.23%、15.38%。加入林下植物之后,各模式的光能利用率都有所提高,其中苹果 + 黄豆模式较单一的苹果模式提升了 340%,达到 0.22,但仍低于传统的玉米种植模式。添加牧草到石榴模式中后,也使其光能利用率提升了 31.82%。与此类似,苹果模式的热量利用效率也最低,仅为 0.21,远低于传统玉米模式的 1.21。剩余各模式中也只有石榴和万寿菊模式的热量利用效率优于传统玉米模式。添加套作植物之后,三种模式的热量利用效率都有上升,其中桃 + 南瓜模式仅提升了 10.2%,而石榴和苹果模式分别提升了 41.95%、347.62%。同样,在七种基本模式中仅有石榴模式和万寿菊模式的水分利用效率优于玉米模式,苹果模式仍为最低。相比与各模式对光、热、水的利用,各模式的土地生产率有截然不同的表现。七种单作模式的土地生产率从高到低依次为:石榴、苹果、万寿菊、梨、柑橘、玉米,相邻模式间均有 17% 以上的差距。石榴模式的土地生产率为传统玉米模式的 44.4 倍,苹果模式的土地生产率也较玉米高出了 686.4%。

3 讨论

在大多数陆地生态系统中, N、P 的有效性限制着植物的

表 2 不同种植模式的资源利用特征

	玉米	万寿菊	柑橘	梨	桃	苹果	石榴	桃 + 南瓜	苹果 + 黄豆	石榴 + 牧草
光能利用率	0.26	0.30	0.09	0.20	0.19	0.05	0.44	0.21	0.22	0.58
热量利用效率	1.21	1.34	0.40	1.02	0.98	0.21	2.05	1.08	0.94	2.91
水分利用效率	6.10	8.84	2.01	4.86	4.63	1.38	10.38	5.12	6.25	13.57
土地生产率	12740	30750	15000	22500	85125	100192	565833	36585	106375	592729

生长 (Gü sewell, 2004)。玉米模式土壤速效养分均为各模式中最低, 速效磷含量仅为 3.57 mg/kg, 低于徐娟等对云南农田土壤研究中的最低值 4.74 mg/kg, 仅为滇东喀斯特高原农田平均含量的 51.4%; 土壤速效钾含量也仅为该研究中的 36.7% (徐娟等, 2014)。玉米模式碱解氮含量也低于云南烟草种植区的平均水平。造成这种结果的最主要原因可能是玉米模式收益少, 因此农户对玉米模式的施肥量也最少, 同时玉米秸秆没有合理还田, 造成了土壤肥力的大量损失。按照朱攀攀等的分级, 研究区柑橘模式的土壤养分中碱解氮、速效磷都处于适量水平, 而速效钾处于缺乏水平 (朱攀攀等, 2019)。苹果模式的速效磷含量接近于昭通市苹果园的最大值 159.91 mg/kg, 碱解氮接近昭通地区的两倍; 而速效钾含量略低于昭通地区最低水平 (59.91 mg/kg) (张定红等, 2018)。这意味着柑橘模式、苹果模式均需要改善施肥结构, 增加钾肥的投入, 与王红叶 (2018) 等人的研究结果一致; 这一状况也可能会随着种植年限增加, 不断改善土壤结构而有所改善 (张静等, 2019)。石榴模式速效磷、碱解氮含量总体处于偏高水平, 速效钾、有机质处于中等水平与蒙自各大石榴种植片区整体一致, 但碱解氮含量远高于 2010 年水平, 这可能与大规模种植后石榴园主为追求高产, 过量施用化肥有关 (刘艳红等, 2010)。

Tessier 等研究表明当植物 N:P<10 或 14, N 是植物生长的限制因素, 而当 N:P>16 或 20 时, 植物生长受 P 限制 (王绍强, 于贵瑞, 2008)。与滇南喀斯特地区的灌木群落相比, C:N 与滇南喀斯特地区的灌木群落相比, 除石榴模式的 C:N 比值低于灌木群落及人工林, 其他模式的 C:N 比值均超过上述各群落, 也超过全球森林土层的平均水平 (12.40), 这意味着除石榴外其他各模式矿化及分解土壤有机质的能力较差 (陶慧敏等, 2019); 但这与曾昭霞等在广西喀斯特区得到的结果接近 (曾昭霞等, 2015)。各模式 C:P 及 N:P 均低于滇南的平均水平也低于内蒙古草原及闽江河口湿地, 这意味着果园植物的生长消耗了大量氮, 从而使生长受到了 N 的限制。同时石榴和玉米的 C:N 低于其他各种模式, 但接近胡培雷等人的研究结果, 说明这两种模式在维持土壤肥力方面可能不如其他模式 (胡培雷等, 2017)。与单作模式相比, 添加林下作物之后, 原模式的资源利用效率均有显著增加, 其增加幅度基本与将双季玉米改为春玉米 - 晚稻的轮作模式相当 (李淑娅等, 2015)。

[参考文献]

[1] 朱鹤健, 何绍福. 农业资源开发中的耦合效应 [J]. 自然资源学 (C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

报, 2003 (05): 583-588.

[2] 王会肖, 刘昌明. 作物水分利用效率内涵及研究进展 [J]. 水科学进展, 2000 (01): 99-104.

[3] 王红丽, 张绪成, 于显枫, 等. 半干旱区氮肥运筹对全膜双垄沟播玉米水肥利用和产量的影响 [J]. 应用生态学报, 2020, 31 (02): 449-458.

[4] 赵亚丽, 薛志伟, 郭海斌, 等. 耕作方式与秸秆还田对冬小麦 - 夏玉米耗水特性和水分利用效率的影响 [J]. 中国农业科学, 2014, 47 (17): 3359-3371.

[5] 张福锁, 马文奇. 肥料投入水平与养分资源高效利用的关系 [J]. 土壤与环境, 2000 (02): 154-157.

[6] 夏晓亮, 石祖梁, 荆奇, 等. 氮肥运筹对稻茬小麦土壤硝态氮含量时空分布和氮素利用的影响 [J]. 土壤学报, 2010, 47 (03): 490-496.

[7] Zhang, Z, Zhou, X. B, Chen, Y. H. Effects of Irrigation and Precision Planting Patterns on Photosynthetic Product of Wheat [J]. Agronomy Journal, 2016, 108 (6): 2322-2328.

[8] Craufurd P Q, Wheeler T R. Climate change and the flowering time of annual crops [J]. Journal of Experimental Botany, 2009, 60: 2529-2539.

[9] Niu S, Xing X, Zhang Z, et al. Water-use efficiency in response to climate change: from leaf to ecosystem in a temperate steppe [J]. Global Change Biology, 2011, 17 (02): 1073-1082.

[10] Xu C, Tao H, Tian B, et al. Limited-irrigation improves water use efficiency and soil reservoir capacity through regulating root and canopy growth of winter wheat [J]. Field Crops Research, 2016, 196: 268-275.

[11] Liu Y, Gao M, Wu W, et al. The effects of conservation tillage practices on the soil water-holding capacity of a non-irrigated apple orchard in the Loess Plateau, China [J]. Soil and Tillage Research, 2013, 130: 7-12.

[12] Duan Y, Xu M, Gao S, et al. Nitrogen use efficiency in a wheat - corn cropping system from 15 years of manure and fertilizer applications [J]. Field Crops Research, 2014, 157: 47-56.

[13] Redfield AC. The biological control of chemical factors in the environment [J]. American Scientist, 1958, 46: 205-221.

[14] Elser JJ, Hassett RP. A stoichiometric analysis of the zooplankton-phytoplankton interaction in marine and freshwater ecosystems [J]. Nature, 1994, 370: 211-213.

[15] Bazzaz F. Plant Resource Allocation [J]. ecology, 1998, 79 (2): 746-747.

[16] Aerts R, Chapin FS III. The mineral nutrition of wild plants revisited: a re-evaluation of processes and patterns [J]. Advances in Ecological Research, 2000, 30: 1-67.

土壤中镉的植物可利用性影响因素探讨

蒋勇兵, 龙唐忠

(湖南省蚕桑科学研究所, 湖南 长沙 410127)

[摘要] 从重金属植物可利用性的概念及其研究方法入手, 重点论述和探讨了影响土壤镉植物可利用性的因素, 提出了要系统梳理影响镉植物可利用性的影响因素, 找出关键因子, 并加强关键影响因素对镉植物可利用性的影响机制研究, 同时强调要在开发超富镉植物和修复植物的产后处置方法等方面的研究上重点发力。

[关键词] 土壤; 重金属; 镉; 植物可利用性; 进展

[中图分类号] X171.1 [文献标识码] A

土壤重金属污染是一个世界性的环境问题, 特别是 2013 年湖南镉 (Cd) 大米事件被媒体披露后, 引起广泛关注。我国受重金属污染的耕地面积有 5000 万 hm^2 , 每年有高达 1200 万 t 的粮食被重金属污染, 直接造成超 200 亿元的经济损失。农田土壤中的 Cd 主要来源于采矿、冶炼、电镀等排放的废水、废渣及污水灌溉、施肥等农业活动。由于 Cd 的迁移性较强, 可以通过食物链富集进入到人体内, 产生致癌、致畸、致突变作用, 日本曾因 Cd 中毒出现过“痛痛病”。重金属污染土壤的植物修复具有成本低、不破坏土壤生态环境、不引起二次污染等优点, 已成为环境污染治理研究领域的的一个前沿性课题。由于植物的生长发育、各种农艺措施、环境条件等都会影响土壤中 Cd 的植物可利用性, 因此, 全面把握土壤中影响 Cd 植物可利用性的因素, 对于修复 Cd 超标农田意义重大。影响 Cd 植物可利用性的因素很多, 本文主要从土壤、植物、重金属等几个方面阐述其对 Cd 植物可利用性的影响, 以期为推动该领域的深入发展提供一定参考。

1 重金属的植物可利用性研究方法

重金属的植物可利用性一般是指土壤中重金属元素在植物体内的吸收、转运、累积或毒性程度。研究重金属植物可利用性的方法一般有化学提取法和植物指示法。

1.1 化学提取法

化学提取法是指利用具有不同反应性强度的化学提取试剂将土壤中的重金属分成不同化学形态来评价该重金属的植物可利用性, 包括单级提取法和连续提取法。土壤中重金属的形态可分为水溶态、交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态以及残渣态等 (见表 1)。

1.2 植物指示法

植物指示法是指在对重金属进行化学形态分析的基础上, 研究能被该土壤上生长的植物所能富集的重金属含量。植物指示法包括盆栽法和大田野外试验法, 盆栽试验是将供试土壤装入一定容积的盆钵中, 栽植试验植物, 在适宜条件下进行生长, 通过测定整株植物或植物各部位的重金属含量来评

[收稿日期] 2021-03-09

[基金项目] 国家自然科学基金 (31901190); 湖南省自然科学基金 (2020JJ5275); 湖南省创新平台与人才计划 (2019NK4238)。

[作者简介] 蒋勇兵 (1987—), 男, 湖南东安人, 助理研究员, 硕士, 研究方向: 重金属污染土壤生态修复。

[通讯作者] 龙唐忠 (1976—), 男, 苗族, 湖南花垣人, 高级农艺师, 硕士, 研究方向: 桑树多元化功能研究与新技术推广。

- [17] Moe SJ, Stelzer RS, Forman MR, et al. Recent advances in ecological stoichiometry: insights for population and community ecology[J]. *Oikos*, 2005, 109:29-39.
- [18] 徐娟, 刘刚, 赵兴祥, 等. 云南农田土壤常量及微量元素含量的测定研究[J]. *中国农学通报*, 2014 (23): 150-154.
- [19] 朱攀攀, 李有芳, 邱洁雅, 等. 云南玉溪柑橘园土壤养分水平和叶片营养状况相关性分析[J]. *果树学报*, 2019, 36 (12): 1658-1666.
- [20] 张定红, 彭吉奎, 王永刚, 等. 云南昭通苹果园土壤成分检测分析[J]. *农业与技术*, 2018 (13): 14-17.
- [21] 王红叶, 李云国, 蔡兆翔, 等. 云南高原特色苹果施肥现状分析[J]. *中国果树*, 2018 (03): 95-97.
- [22] 张静, 黄兴科, 罗雅曦, 等. 宁夏凤沙区苹果园地土壤质量及硒元素评价[J]. *水土保持通报*, 2019, 39 (06): 66-76.
- [23] 刘艳红, 张德刚, 刘杰, 等. 云南蒙自石榴园土壤养分状况及施肥情况调查[J]. *北方园艺*, 2010 (16): 39-41.
- [24] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. *生态学报*, 2008 (08): 3937-3947.
- [25] 陶慧敏, 孙宁晓, 温家豪, 等. 滇南喀斯特地区灌木群落和人工林土壤元素化学计量特征[J]. *生态学报*, 2019, 39 (24): 9119-9130.
- [26] 曾昭霞, 王克林, 刘孝利, 等. 桂西北喀斯特森林植物-凋落物-土壤生态化学计量特征[J]. *植物生态学报*, 2015 (07): 682-693.
- [27] 胡培雷, 王克林, 曾昭霞, 等. 喀斯特石漠化地区不同退耕年限下桂牧 1 号杂交象草植物-土壤-微生物生态化学计量特征[J]. *生态学报*, 2017 (03): 896-905.
- [28] 李淑娅, 田少阳, 袁国印, 等. 长江中游不同水稻种植模式产量及资源利用效率的比较研究[J]. *作物学报*, 2015, 41 (10): 1537-1547.