

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2013.00665

大麦长期肥料效率和土壤养分平衡

唐旭¹ 陈义^{1,*} 吴春艳¹ 杨生茂¹ 刘玉学¹ 吕豪豪¹
马义兵² 李菊梅²

¹浙江省农业科学院环境资源与土壤肥料研究所, 浙江杭州 310021; ²中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081

摘要: 基于 19 年田间定位试验, 通过测定氮、磷、钾肥不同配施处理下, 大麦地上部生物量、产量及籽粒和秸秆中各养分含量, 研究了大麦生长期土壤和环境养分供应状况、肥料效率和土壤养分表观平衡。结果表明, 不施肥条件下, 平均每年大麦可从土壤和环境吸收氮、磷和钾素 44.5、10.7 和 52.5 kg hm⁻²; 大麦籽粒中氮、磷、钾含量平均为 17.3、3.48 和 4.18 g kg⁻¹, 秸秆中为 4.85、0.64 和 17.50 g kg⁻¹。所吸收的氮素和磷素分别有 75.7%和 83.5%被转运至籽粒中, 但钾的转运率仅为 18.8%。大麦生产单位籽粒所需的氮素和钾素相当, 约为吸磷量的 5~6 倍。每生产 1000 kg 籽粒, 需要吸收氮素 22.3 kg、磷素 4.0 kg 和钾素 20.5 kg。19 年平均氮、磷和钾肥的表观利用率分别为 29.0%、12.8%和 71.8%, 累积回收率为 75.3%、63.6%和 203.2%。在氮磷钾平衡施肥条件下, 每年土壤氮素和磷素可盈余 18.4 kg hm⁻² 和 6.9 kg hm⁻², 但是土壤钾素平均每年亏缺 43.8 kg hm⁻²; 这种基础养分供给处理可维持每年大麦产量 2350 kg hm⁻² 左右。

关键词: 长期定位施肥; 大麦; 籽粒产量; 养分供应能力; 肥料效率; 平衡施肥

Fertilizer Efficiency and Soil Apparent Nutrient Balance for Barley under Long-Term Fertilization

TANG Xu¹, CHEN Yi^{1,*}, WU Chun-Yan¹, YANG Sheng-Mao¹, LIU Yu-Xue¹, LÜ Hao-Hao¹, MA Yi-Bing², and LI Ju-Mei²

¹ Institute of Environment, Resource, Soil and Fertilizer, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China; ² Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

Abstract: In the 19-year located fertilization experiment in barley, five treatments were designed with different combinations of nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K) fertilizers. The natural productivities of nutrient elements from soil and environment, fertilizer efficiencies and soil nutrient apparent balances were investigated by measuring aboveground biomass, grain yield, and nutrient contents in grain and straw. Under no fertilization condition, the amounts of nutrient supply from soil and environment were 44.5, 10.7, and 52.5 kg ha⁻¹ for N, P, and K elements, respectively. The average N, P, and K contents were 17.30, 3.48, and 4.18 g kg⁻¹ in grain and 4.85, 0.64, and 17.50 g kg⁻¹ in straw, respectively. The percentages of nutrient elements translocated from aboveground organs into grain were 75.7% for N, 83.5% for P and 18.8% for K. This result indicated that the most of N and P absorbed by plant were ultimately deposited into grains, whereas more than 80% K absorbed remained in straws. For producing 1000 kg grain, barley plant required absorptions of 22.3 kg N, 4.0 kg P, and 20.5 kg K. Clearly, the P requirement was 5–6 times the requirement of N or K. The average apparent fertilizer use efficiencies for N, P, and K fertilizers were 29.0%, 12.8%, and 71.8%, respectively. The average accumulative recovery efficiencies of N, P, and K over 19 years were 75.3%, 63.6%, and 203.2%, respectively. Under balanced fertilization with fixed N, P and K inputs, there were annual net gains of 18.4 kg ha⁻¹ for N and 6.9 kg ha⁻¹ for P, but a net loss of 43.8 kg ha⁻¹ for K in soil. Such soil condition produced barley yield of 2350 kg ha⁻¹ per year.

Keywords: Long-term located fertilization; Barley; Grain yield; Nutrient supplying capacity; Fertilizer efficiency; Balanced fertilization

本研究由国家公益性行业(农业)科研专项(201003013, 201003014), 国家科技支撑计划项目(2011BAD11B05)和浙江省自然科学基金项目(LY12C15005)资助。

* 通讯作者(Corresponding author): 陈义, E-mail: chenyi1962@yeah.net

第一作者联系方式: E-mail: tangxuyn@126.com, Tel: 0571-86404269

Received(收稿日期): 2012-08-31; Accepted(接受日期): 2012-12-09; Published online(网络出版日期): 2013-01-28.

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20130128.0920.018.html>

作物高产和环境友好是保证我国粮食安全和农业可持续发展的重要内容。化肥投入是保障粮食高产的重要手段,但过量施肥、忽视土壤和环境本身养分供应能力以及作物目标产量对养分的需求,将造成低资源利用率和高风险^[1-5]。长期试验结果表明,在水旱轮作系统中,紫色土供氮、磷和钾量分别达 119.0、19.0 和 148.7 kg hm⁻²,可维持每年生产小麦 1400 kg hm⁻² 及稻谷 3000~4000 kg hm⁻² [6]。松嫩平原黑土每年可为小麦和玉米供氮、磷和钾量分别为 55~99、14~26 和 48~93 kg hm⁻² [7]。在黄土旱塬,小麦每年可获得氮和磷量分别为 27.2 kg hm⁻² 和 7.31 kg hm⁻²,作物吸收的氮和磷素有 66.6% 和 28.7% 来源于肥料^[8]。根据作物的养分内部利用率可获得作物单位籽粒产量对养分的需要量^[9]。Witt 等^[9] 收集了 1995—1997 年亚洲 6 个国家的 200 块农田和 7 个长期田间试验数据,研究结果表明,在养分平衡条件下每生产 1000 kg 稻谷植物需吸收氮 14.7 kg、磷 2.6 kg 和钾 14.5 kg。根据 7 个 1985—1995 年的长期田间试验的结果,每生产 1000 kg 籽粒,小麦需要吸收 17.9~40.0 kg 氮、2.7~5.8 kg 磷和 14.9~41.7 kg 钾,玉米需要吸收 15.6~47.6 kg 氮、2.6~7.9 kg 磷和 11.1~50.0 kg 钾^[10]。

大麦是啤酒酿造的重要原料和良好饲料。目前,我国大麦种植面积约为 86 万公顷,总产量达 343 万吨^[11],并且对大麦的需求量还在逐年增加。以往对大麦栽培模式及生长期间肥料管理的一些研究主要集中在施肥对大麦生长发育和品质的影响、大麦品种对低氮胁迫的响应,不同施肥处理的肥料效率等^[12-17]。然而在长期施肥条件下,肥料的残留及其后效,长期施肥后土壤养分状况,以及平衡施肥与偏施一、两种大量元素对大麦产量的潜在影响等,都缺乏深入研究。明确土壤和环境养分的供应能力、单位产量对养分的需求规律以及土壤养分平衡等可为大麦高产高效生产提供理论指导。本研究通过 19 年长期定位试验,利用大麦地上部生物量及其养分含量,探索大麦生长期土壤和环境对养分的供应能力,明确大麦籽粒产量与养分吸收量间的数量关系,揭示长期施肥条件下麦田肥料效率和土壤养分表观平衡状况,以期达到作物持续高产和生态安全的目的。

1 材料与方 法

1.1 试验地概述

试验地位于浙江省嘉兴地区海宁市许村镇杨渡

村(30°26'07"N, 120°24'23"E, 海拔 3~4 m), 大麦生长期(11月至翌年5月)平均气温 13.3℃, 相对湿度 74.5%, 降水量 961 mm, 日照时数 1040.7 h。试验地土壤属于水稻土类、渗育型水稻土亚类、黄松田土属。耕层土壤(0~20 cm)含有机质 25.6 g kg⁻¹、全氮 1.52 g kg⁻¹、全磷 1.03 g kg⁻¹、全钾 18.6 g kg⁻¹、碱解氮 122.6 mg kg⁻¹、有效磷 44.6 mg kg⁻¹、速效钾 61.6 mg kg⁻¹、阳离子交换量 14.6 cmol kg⁻¹、pH 6.4。小区面积为 300 m², 1 次重复; 各小区独立排灌, 之间用 60 cm 深的水泥板隔开, 互不侧渗。

1.2 试验设计

试验开始于 1990 年 11 月, 共设 5 个处理, 分别是不施肥(CK)、单施氮肥(N)、氮磷肥配施(NP)、氮钾肥配施(NK)和氮磷钾平衡施肥(NPK)。1990—2000 年大麦全生育期施纯 N 75 kg hm⁻²、P₂O₅ 37.5 kg hm⁻²、K₂O 37.5 kg hm⁻²; 自 2001 年开始施肥量改为纯 N 120 kg hm⁻²、P₂O₅ 60 kg hm⁻² 和 K₂O 60 kg hm⁻²。肥料为尿素(含 N 46.4%)、过磷酸钙(含 P₂O₅ 16%)和氯化钾(含 K₂O 60%)。磷肥和钾肥及 70% 氮肥作基肥于播种前施用, 另 30% 氮肥于大麦返青期追施。按当地常规栽培措施进行田间管理。每年 11 月中下旬播种, 次年 5 月上中旬收获。大麦收获以后移栽水稻。供试大麦品种为浙江省农业科学院大麦研究中心培育的浙 88-18、浙 B8 和浙 B10。

1.3 取样及样品分析

大麦成熟后手工收获, 割取地上部全部生物量, 田间只留 <3 cm 的麦茬。收获后测定整个小区实际籽粒产量, 籽粒经风干、脱粒后放入烘箱, 在 65℃ 下烘至恒重, 然后称重。同时每小区取 15 株植株烘干、粉碎, 用于植株养分分析。

按土壤农化常规分析方法^[18]测定土壤和植株中各养分的含量。用重铬酸钾容量法测定土壤有机质; 用凯氏定氮法测定全氮; 用碱熔-钼锑抗比色法测定全磷; 用 NaOH 熔融-火焰光度计法测定全钾; 用扩散法测定碱解氮; 用 Olsen 法测定速效磷; 用 1 mol L⁻¹ NH₄OAc 浸提-火焰光度计法测定速效钾; 用电位法($V_{\text{水}} - V_{\text{土}} = 2.5 - 1.0$)测定土壤 pH 值。植株经 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮后, 分别采用凯氏定氮法、钼蓝比色法和火焰光度计法测定植株氮、磷和钾含量。

1.4 养分利用效率指标及计算方法

养分收获指数(harvest index, HI)指籽粒中养分吸收量占地上部该养分吸收总量的百分率^[9], $HI = U_G/U$, 其中 U_G 是籽粒中养分吸收量(kg hm⁻²), U 为

收获时地上部养分吸收量(kg hm^{-2})。养分内部利用率(internal efficiency, IE)^[9]指籽粒产量与地上部某一养分吸收量的比值,表示大麦每吸收单位该养分所获得的产量, $IE = Y/U$, 其中 Y 是籽粒产量(kg hm^{-2})。土壤养分表观平衡(apparent balance, AB)^[19]指在某段时间内,以肥料形式施入土壤中的养分量与大麦吸收的养分量的差值, $AB = IF - U_t$, 其中 U_t 是地上部吸收的养分总量(kg hm^{-2}), IF 为施入土壤的肥料总量(kg hm^{-2});本研究不考虑通过种子、灌溉水、作物根茬、降水和干沉降等途径进入土壤的养分量,也不考虑通过蒸发、淋失等途径损失的养分量。养分表观利用率(apparent recovery efficiency, RE)^[19-20]反映大麦对施入土壤中肥料的利用效率, $RE = (U_F - U_0)/IF$, 其中 U_F 为施肥处理收获时地上部的养分吸收量(kg hm^{-2}), U_0 为未施肥处理收获期地上部的养分吸收量(kg hm^{-2})。养分累积回收率(accumulative recovery efficiency, ARE)^[19]指在某段时间内,大麦地上部吸收的养分总量占肥料施入量的百分率, $ARE = U_t/IF$ 。

1.5 统计分析

将不同年份作为试验重复,用 SAS 9.0 统计软件统计分析数据。用 Origin 7.0 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同处理长期施肥对大麦产量的影响

长期不施肥(CK),大麦籽粒产量在 1380~2960 kg hm^{-2} 之间变动,19 年平均产量为 2350 kg hm^{-2} ,相当于平衡施肥处理(NPK)的 72.6%。随着试验年份的延长,土壤生产能力逐年下降,尤其是单施 NP 的大麦减产尤为明显,在试验期间平均每年以 43.1 kg hm^{-2} 的速度降低。NPK 处理大麦产量也以每年 24.5 kg hm^{-2} 的速率降低(图 1)。尽管近 4 年 CK 处理的大麦籽粒产量有所降低,但历年变化不大,这主要是因为试验开始时产量就比较低,仅占平衡施肥处理的 64.2%。

2.2 不同处理长期施肥对大麦籽粒及秸秆中养分含量的影响

大麦籽粒中平均氮、磷、钾含量分别为 17.30、3.48 和 4.18 g kg^{-1} ,秸秆中平均含量分别为 4.85、0.64 和 17.50 g kg^{-1} 。尽管施肥水平、品种及年度间气候条件存在差异,但籽粒及秸秆中全氮和全磷含量变化不大。其中,籽粒中全氮含量变幅为 13.0~21.1 g kg^{-1} ,全磷含量变幅为 2.12~5.55 g kg^{-1} ;秸秆中氮含

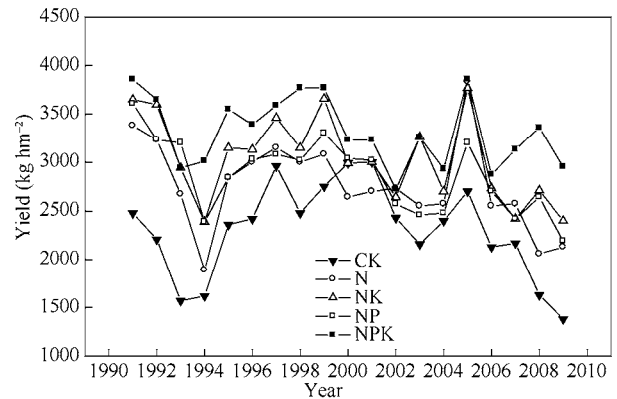


图 1 大麦不同施肥处理 19 年产量变化
Fig. 1 Variations of grain yields of barley under different fertilization treatments for 19 years

量为 3.12~7.81 g kg^{-1} ,磷含量为 0.22~1.22 g kg^{-1} 。与此相反,籽粒(1.60~8.10 g kg^{-1})和秸秆中钾含量在年度间变化较大,尤其是秸秆中的钾含量,在 7.6~31.8 g kg^{-1} 之间(图 2)。

2.3 不同处理长期施肥对大麦养分吸收量的影响

CK 处理条件下,大麦每年从土壤和环境吸收氮 20.8~61.7 kg hm^{-2} ,平均 44.5 kg hm^{-2} 。施氮肥促进了大麦对氮素的吸收,以 NPK 处理效果最明显,比 CK 处理的吸氮量高 75.1%(表 1)。N、NK 和 NP 处理的吸氮量在数值上相近,说明在本试验条件下单独增加磷或钾肥不能促进大麦对氮素的吸收。

长期不施磷的 CK、N 和 NK 处理,大麦平均吸磷量为 10.7 kg hm^{-2} 。N 和 NK 处理的大麦平均每年吸磷量比 CK 高 34.1%和 42.4%,而 NPK 处理的吸磷量又比 NK 处理高 16.5%(表 1)。说明施用氮肥能促进大麦对磷的吸收,尤其氮与钾肥配施效果更好。

长期不施钾的 CK、N 和 NP 处理,大麦平均吸钾量为 52.5 kg hm^{-2} 。N 处理未提高大麦吸钾量,而 NP 处理的吸钾量比 CK 高 35.1%;NK 和 NPK 处理的吸钾量分别比 N 和 NP 处理高 44.8%和 41.3%(表 1)。

在不同施肥处理中,大麦氮、磷和钾素收获指数分别为 75.7%、83.5%和 18.8%,且不同施肥处理间同一种养分收获指数变化很小(表 1)。说明大麦所吸收的氮和磷绝大部分已转运到籽粒,而大部分钾素被累积在秸秆中,同时也说明收获指数是一个相对恒定的值,基本不受施肥方式和施肥量的影响。

2.4 大麦籽粒产量与地上部养分吸收量的关系

在产量较低时,大麦籽粒产量与氮、磷和钾素的吸收量呈线性关系,此时营养元素的吸收量是产量的主要限制因子;当产量接近最大值时,其随养

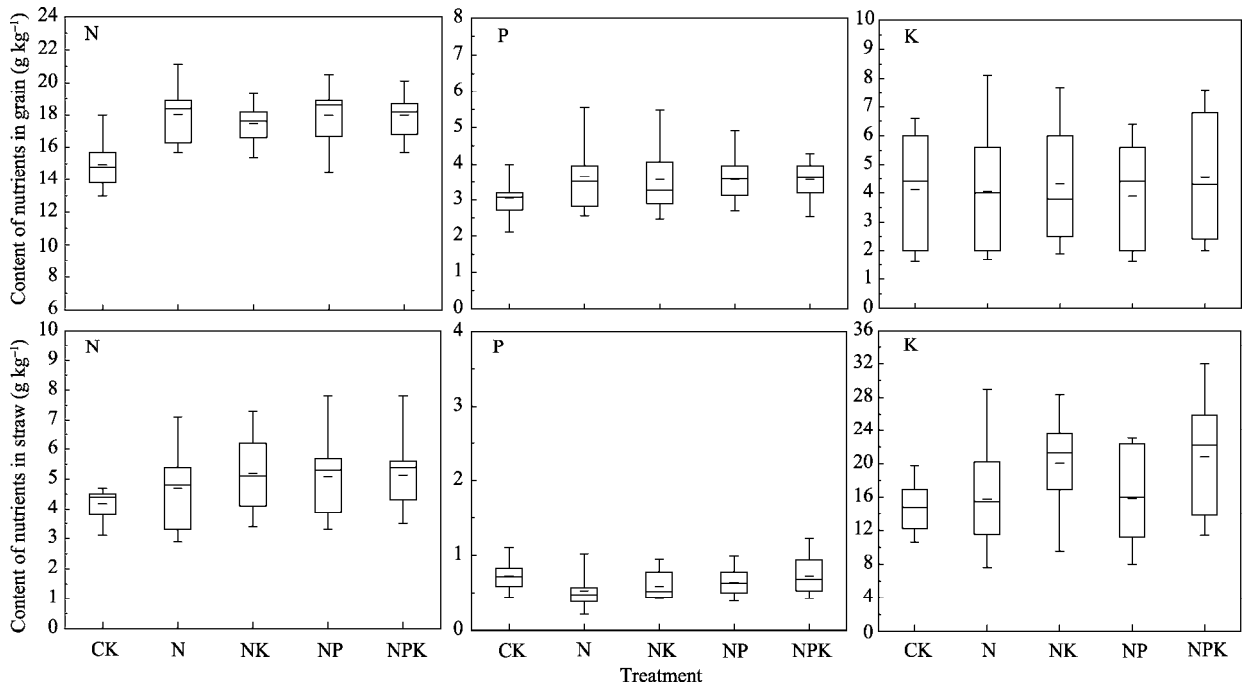


图 2 大麦籽粒和秸秆中全氮、磷和钾含量

Fig. 2 Contents of N, P and K elements in grain and straw of barley

图形中工字形线、矩形框和长横线分别表示 5%~95%、25%~75%和 50% 短横线表示平均值。

The I-shaped, rectangular, and long-bar symbols indicate 5~95%, 25~75%, and 50% of the nutrient content, respectively. The short bar indicates the mean value.

表 1 大麦籽粒和地上部养分吸收量及各养分收获指数

Table 1 Nutrient uptakes in grain and aboveground biomass and harvest index in Barley

处理 Treatment	籽粒 Grain (kg hm ⁻²)			地上部 Aboveground (kg hm ⁻²)			收获指数 Harvest index (%)		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K
对照 CK	33.8 c	6.76 c	9.02 c	44.5 c	8.5 c	43.9 c	75.9 a	79.6 a	20.5 a
N	53.0 b	9.88 b	11.0 bc	69.1 b	11.4 b	54.3 b	76.7 a	86.8 a	20.4 a
NK	53.6 b	10.7 ab	11.0 bc	71.9 ab	12.6 b	59.3 b	74.6 a	83.6 a	18.6 a
NP	53.9 b	10.1 ab	13.1 ab	71.3 ab	12.1 b	78.6 a	75.5 a	85.0 a	16.6 a
NPK	58.9 a	11.7 a	15.0 a	77.9 a	14.1 a	83.8 a	75.6 a	82.6 a	17.9 a

大麦籽粒和地上部吸收量数据是各处理 19 年的平均值，同行数据后不同字母表示差异达 5%显著水平。

Data of barley nutrient uptakes from grain and aboveground biomass in the table is an average for 19 years. Values followed by different letters in a row are significant by different at 5% probability level.

分吸收量增加而增加的趋势表现平缓，尤其以氮和磷表现明显(图 3)。籽粒产量与地上部养分吸收量具有显著相关性，决定系数均达极显著水平，与吸氮量的关系最为密切，与吸钾量的关系较小。这一结果说明在本试验条件下氮素是影响大麦产量的第一限制因子，而由于大麦成熟后地上部吸收的钾素 80% 以上被累积在茎秆中(表 1)，因而吸钾量与籽粒产量的相关系数较小。

不施氮、磷或钾处理相应的氮、磷、钾元素的内部利用率均比施同种肥的处理高，但不同施肥处理的单位籽粒所需氮、磷和钾量比例却很相似(5.15~

5.73 1.00 4.51~5.81)，平均 5.5 1.0 5.1 (表 2)。这表明每生产 1000 kg 大麦籽粒，需吸收氮、磷和钾素分别为 22.3、4.0 和 20.5 kg。

2.5 养分表观平衡与回收率

长期种植大麦造成不施肥(CK)土壤中氮素平均每年亏缺 44.5 kg hm⁻²；施氮肥可使土壤氮素出现盈余，但在施氮的基础上增施磷或钾肥，土壤氮素盈余量出现下降，尤其在平衡施肥条件下(NPK 处理)，土壤氮素盈余量比单施氮肥(N 处理)降低 32.4%。不施磷肥条件下(CK、N 和 NK 处理)，大麦每年带走磷 8.5~12.1 kg hm⁻²，在不施磷条件下施用氮、钾会加

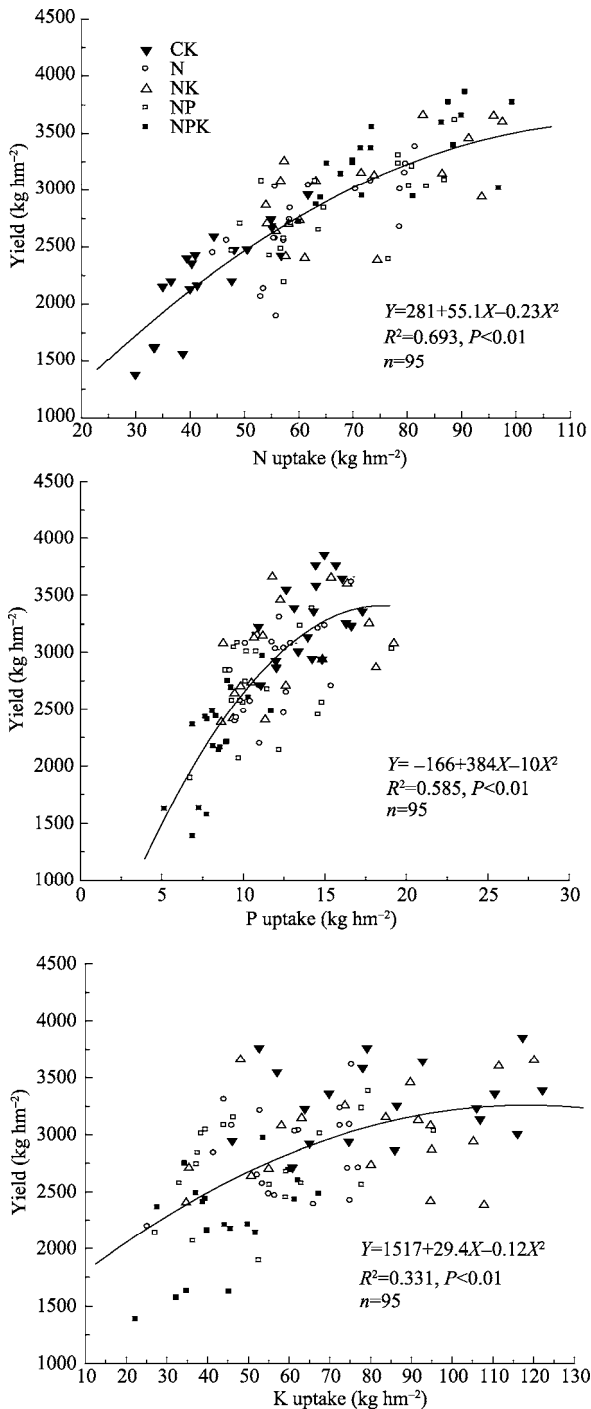


图 3 大麦籽粒产量与地上部养分吸收量的关系

Fig. 3 Relationships between grain yield and nutrient absorption amounts in aboveground organs of barley

速土壤中磷的消耗; 而施磷(NP 和 NPK)则会引起平均每年 7.7 kg hm^{-2} 的磷累积在土壤中。与氮、磷素不同, 无论施钾与否, 各施肥处理土壤钾素均表现明显的亏缺(表 3)。尽管施钾降低了土壤钾素亏缺, 但增施氮、磷肥却加速了土壤中钾的消耗, 各施肥处理年亏缺量平均为 48 kg hm^{-2} 。

连续偏施氮肥, 19 年氮素表观利用率平均为 27.1%, 累积回收率可达 73.4%, 而在平衡施肥条件下氮素表观利用率和累积回收率分别提高了 28.1% 和 10.3% (表 3)。大麦磷素长期表观利用率仅为 12.8%, 而累积回收率可达 63.6%。表 3 的数据表明钾素 19 年表观利用率为 71.8%, 累积回收率高达 203.2%。

3 讨论

不施肥大麦生长期土壤和环境每年可供氮、磷和钾素分别为 44.5 、 10.8 和 53.1 kg hm^{-2} 。这些来源于土壤中矿质态、有机质的矿化以及随降水降尘和种子等带入的养分可维持每年生产大麦约 2350 kg hm^{-2} , 相当于平衡施肥处理(NPK)大麦产量的 72.6%。由此看出, 土壤和环境对大麦产量的贡献率约为 70%, 肥料的增产贡献率为 30%。王定勇等^[6]对紫色土的长期研究结果表明, 土壤和环境对水稻和小麦的贡献率可达 58% 和 51%。尽管由于土壤、作物和气候条件的差异, 可能造成土壤和环境养分供应能力不同, 但在作物生长阶段来源于土壤和环境本身的养分对维持和提高作物产量发挥了极其重要的作用, 这部分养分在实际生产中是不可忽视的重要资源。同时我们也发现, 尽管年度间数据有一定的波动, 但平衡施肥处理的大麦产量呈现逐年下降的趋势, 这主要是由于无机肥长期施用破坏了土壤结构稳定性^[21], 且土壤逐渐酸化也制约了大麦生长; 另一方面随着试验年份的延长, 大麦对养分的不断吸收也造成土壤中其他营养元素出现亏缺, 尤其是微量元素, 最终影响大麦的生长发育和产量。

本研究表明, 大麦所吸收的氮和磷绝大部分被转运到籽粒, 而钾的转运量还不到 19%。在水稻上, Witt 等^[9]曾报道过类似结果, 籽粒中的氮素和磷素含量占地上部吸氮总量的 59% 和 66%, 而吸收的钾素仅有 17% 分配在籽粒中, 茎叶中累积了绝大部分钾素。在小麦上, 张福锁等^[20]指出成熟期冬小麦钾素收获指数仅为 16%~18%。因此, 秸秆还田可有效补充土壤钾素, 但无法弥补氮素和磷素的消耗, 因为收获籽粒直接带走作物已吸收的绝大部分氮素和磷素, 所以在秸秆还田管理措施中要加强氮和磷肥的补充。

养分内部利用率是综合评价大麦养分利用效率的重要指标之一, 也是大麦科学施肥的基础理论依据。Liu 等^[10]采用 QUEFTS 模型方法确定了施肥条

表 2 不同施肥处理的大麦养分内部效率
Table 2 Nutrient internal efficiency in barley under different fertilization treatments (kg kg⁻¹)

处理 Treatment	N	P	K
对照 CK	51.9±1.5	267.5±9.2	54.9±3.1
N	43.9±1.5	249.4±12.1	55.3±4.0
NK	43.5±1.7	249.4±12.0	42.9±3.8
NP	43.0±1.5	238.5±7.8	52.4±3.3
NPK	43.0±1.1	235.3±6.6	42.4±3.0
平均 Average	45.0	247.7	48.7

数据为 19 年试验的平均值±标准误。Data are shown as mean±SE of 19 years' experiments.

表 3 土壤养分表观平衡与养分累积回收率
Table 3 Nutrient apparent balance and accumulative recovery efficiency

处理 Treatment	养分施入量 Input (kg hm ⁻²)			养分吸收量 Absorption (kg hm ⁻²)			表观利用率 RE (%)			累积回收率 ARE (%)			年剩余量 Surplus (kg hm ⁻²)		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K
对照 CK				845.5	161.5	834.1							-44.5	-8.5	-43.9
N	1830.0			1312.9	216.6	1031.7	25.0			71.4			27.2	-11.4	-54.3
NK	1830.0		759.3	1354.7	229.9	1493.4	27.8		65.3	74.0		196.7	25.0	-12.1	-38.6
NP	1830.0	399.2		1366.1	239.4	1126.7	28.4	9.2		74.7	60.0		24.4	8.4	-59.3
NPK	1830.0	399.2	759.3	1480.1	267.9	1592.2	34.7	16.3	78.3	80.9	67.1	209.7	18.4	6.9	-43.8

养分吸收量、施入量、表观利用率和累积回收率是各处理 19 年的累积值。

Data of uptake, input, apparent recovery efficiency (RE) and accumulative recovery efficiency (ARE) are the sum of 19 years' experiment.

件下冬小麦氮、磷和钾的内部利用率范围在 25~56、171~367 和 24~67 kg kg⁻¹ 之间, 而玉米的氮、磷、钾内部利用率分别为 21~64、126~384 和 20~90 kg kg⁻¹。在水旱轮作系统中, 冬小麦和水稻在施磷处理中的磷素内部效率为 200~231 kg kg⁻¹ 和 296~350 kg kg⁻¹ [23]。本研究表明, 不同施肥处理大麦氮、磷和钾内部利用率范围为 43.0~51.9、235.3~267.5 和 42.4~55.3 kg kg⁻¹, 与冬小麦、玉米和水稻的养分内部利用率相似。不同施肥处理大麦生产单位籽粒所需氮、磷和钾比例为 5.5 1.0 5.1。水稻的相应比例为 6.1 1.0 5.6 [9], 小麦和玉米分别为 6.7 1.0 6.2 和 6.0 1.0 5.4 [10]。以上结果说明不同作物地上部所吸收的氮和钾总量相似, 都比吸磷量高约 5~6 倍。张福锁等 [20] 在 2000—2005 年全国粮食主产区开展了 1333 个田间试验, 结果表明, 我国主要粮食作物的氮、磷和钾肥利用率平均为 27.5%、11.6% 和 31.3%。本研究经过 19 年长期定位试验, 发现在不同施肥条件下大麦氮和磷的平均表观利用率分别为 29.0% 和 12.8%, 与张福锁等 [20] 的报道相似; 但在本研究条件下, 钾肥表观利用率高达 71.8%, 这主要是因为每年大麦施钾量比吸钾量低 38.7%~61.7%, 造成土壤钾素平均每年亏缺 48 kg hm⁻²。尽管作物养

分吸收量及产量很大程度上取决于施肥情况, 但并非所有肥料都能被当季作物吸收利用, 部分被固定下来为下季作物所利用, 部分则永久损失(如淋失、挥发等), 肥料表观利用率可以反应当季作物对肥料中养分的吸收情况。但随着我国经济快速增长、畜牧业的发展以及化学肥料施用量的增加, 通过大气干湿沉降、灌溉水等途径进入农田生态系统的环境养分数量越来越大, 已成为农业生态系统的重要补充。我们的研究表明, 平衡施肥大麦 19 年的氮和磷累积回收率可达 80.9% 和 67.1%; 类似地, 在玉米-冬小麦轮作系统中, 平衡施肥条件下氮和磷 15 年的累积回收率为 69% [20] 和 49% [19]。可见养分累积回收率清楚地表明了养分投入与产出的关系, 是反应作物实际对养分吸收状况的一个重要参数, 可作为大麦生产中肥料合理施用的一个主要指标。

随着农产品质量的改善, 作物单产水平的提高, 复种指数的增加, 氮、磷肥用量的加大以及种植户将作物秸秆作为燃料和家畜饲草或为易于耕作将其燃烧均已导致农田生态系统处于负钾素平衡状态, 土壤缺钾问题越来越严重 [21,24-25]。每季大麦施钾 (K₂O) 37.5~60 kg hm⁻² 的条件下, 土壤钾素亏缺约 48 kg hm⁻², 这说明至少每季应补充投入钾素 50 kg

hm⁻²才能基本维持土壤钾平衡。廖育林等^[24]通过在丘陵红黄泥田上的试验研究,指出每季水稻施 K₂O 112.5、150 和 187.5 kg hm⁻²条件下,土壤钾素平衡出现亏缺;廖育林等^[25]的进一步研究表明氮磷肥配施有机肥可大幅度降低稻田土壤钾素的亏损,每年亏损钾素仅 2.2 kg hm⁻²,尤其在有机与无机肥配施情况下可使土壤钾素盈余 154.5 kg hm⁻²。然而,过量施钾可导致钾营养元素大量流失,降低钾肥资源利用效益并增加环境污染风险,所以土壤钾素平衡问题应引起高度重视。

4 结论

长期不施肥,土壤养分对大麦产量的贡献率为 73%,每年可生产大麦籽粒 2350 kg hm⁻²。大麦所吸收的绝大部分氮和磷素被累积在籽粒中,但钾仅为 19%,而且所吸收的氮和钾总量相似,比吸磷量高约 5~6 倍。每生产 1 t 籽粒,需要大麦吸收氮、磷和钾素分别为 22.3、4.0 和 20.5 kg。长期施肥条件下,75%的氮和 64%的磷可被大麦吸收利用,但每年施 K₂O 37.5~60 kg hm⁻²的条件下,土壤钾素仍表现亏缺。

References

- [1] Zhu Z-L(朱兆良), Wen Q-X(文启孝). Nitrogen Element in Soil in China (中国土壤氮素). Nanjing: Jiangsu Science and Technology Publishing House, 1992. pp 228-245 (in Chinese)
- [2] Cao Y-L(曹仁林), Jia X-K(贾晓葵). The contaminated problems and prevention methods of nitrogen in intensive agriculture. *Soil Fert* (土壤肥料), 2001, (3): 3-6 (in Chinese with English abstract)
- [3] Sun Z-M(孙志梅), Wu Z-J(武志杰), Chen L-J(陈利军), Liu Y-G(刘永刚). Research advances in nitrogen fertilization and its environmental effects. *Chin J Soil Sci* (土壤通报), 2006, (4): 782-785 (in Chinese with English abstract)
- [4] Ma W-Q(马文奇), Zhang F-S(张福锁), Zhang W-F(张卫锋). Fertilizer production and consumption and the resources, environment, food security and sustainable development in China. *Resour Sci* (资源科学), 2005, 27(3): 33-40 (in Chinese with English abstract)
- [5] Wang J-Q(王激清), Ma W-Q(马文奇), Jiang R-F(江荣风), Zhang F-S(张福锁). Integrated soil nutrients management and China's food security. *Resour Sci* (资源科学), 2008, 30(3): 415-422 (in Chinese with English abstract)
- [6] Wang D-Y(王定勇), Shi X-J(石孝均), Mao Z-Y(毛知耘). Study on nutrient supplying capacity of purple soil under long-term rice-wheat rotation. *Plant Nutr Fert Sci* (植物营养与肥料学报), 2004, 10(2): 120-126 (in Chinese with English abstract)
- [7] Wang J-G(王建国), Liu H-X(刘鸿翔). Study on nutrient supply capacity of black soil. *Acta Pedol Sin* (土壤学报), 1997, 34(3): 295-301 (in Chinese with English abstract)
- [8] Dang T-H(党廷辉), Guo S-L(郭胜利), Hao M-D(郝明德). Study on N, P natural supplying capacity and their source absorbed by winter wheat in arid highland under long-term fertilization conditions. *Plant Nutr Fert Sci* (植物营养与肥料学报), 2001, 7(2): 166-171 (in Chinese with English abstract)
- [9] Witt C, Dobermann A, Abdulrachman S, Ginge H C, Wang G, Narajan R, Satawatananont S, Son T T, Tan P S, Tiem L V, Simbahan G C, Olk D C. Internal nutrient efficiencies of irrigated lowland rice in tropical and subtropical Asia. *Field Crops Res*, 1999, 63: 113-138
- [10] Liu M, Yu Z, Liu Y, Konijn N T. Fertilizer requirements for wheat and maize in China: the QUEFTS approach. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 2006, 74: 245-258
- [11] National Bureau of Statistics of China (国家统计局). China Statistical Year Book (中国统计年鉴). Beijing: China Statistics Press, 2008 (in Chinese)
- [12] Cai J(蔡剑), Jiang D(姜东), Dai T-B(戴廷波), Cao W-X(曹卫星). Effects of nitrogen application rates on nitrogen uptake and use, protein accumulation, and grain yield in malting barley. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2009, 35(11): 2116-2121 (in Chinese with English abstract)
- [13] Yang J-H(杨金华), Cheng J-S(程加省), Yu Y-X(于亚雄), Xu Y-X(许云祥). Effect of different cultivation model on barley leaf characteristics. *Southwest China J Agric Sci* (西南农业学报), 2010, 23(1): 37-40 (in Chinese with English abstract)
- [14] Chen Z-W(陈志伟), Zou L(邹磊), Lu R-J(陆瑞菊), Wang Y-F(王亦菲), He T(何婷), Du Z-Z(杜志钊), Zhang Y-M(张艳敏), Huang J-H(黄剑华). Study on the relationship between the traits for low nitrogen tolerance of different barley genotypes at seedling stage and grain yield. *J Triticeae Crops* (麦类作物学报), 2010, 30(1): 158-162 (in Chinese with English abstract)
- [15] Cheng S-Z(程素贞). Effect of P-fertilization level on the content, distribution of Mo, Fe in beer barley and on its yield and quality. *Acta Pedol Sin* (土壤学报), 1997, 34(4): 444-450 (in Chinese with English abstract)
- [16] Mao Y(毛盈), Chen X(陈鑫), Qiu B-Y(裘波音), Wu F-B(邬飞波), Zhang G-P(张国平). Effects of nitrogen and phosphorus fertilizer application rates on phytic acid content in barley grains. *J Zhejiang Univ (Agric & Life Sci)* (浙江大学学报·农业与生命科学版), 2009, 35(3): 285-291 (in Chinese with English abstract)
- [17] Wu Y-S(吴延寿), Xu Y-C(徐阳春), Shen Q-R(沈其荣), Zhou C-L(周春霖). Effect of rice cultivation pattern on growth of fol-

- lowing barley crop and soil nitrogen and nitrogen use efficiency. *Acta Pedol Sin* (土壤学报), 2006, 43(1): 168–172 (in Chinese with English abstract)
- [18] Lu R-K(鲁如坤). Analytical Methods for Soil Agricultural Chemistry (土壤农业化学分析方法). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999 (in Chinese)
- [19] Tang X, Li J M, Ma Y B, Hao X, Li X Y. Phosphorus efficiency in long-term (15 years) wheat–maize cropping systems with various soil and climate conditions. *Field Crops Res*, 2008, 108: 231–237
- [20] Zhang F-S(张福锁), Wang J-Q(王激清), Zhang W-F(张卫峰), Cui Z-L(崔振岭), Ma W-Q(马文奇), Chen X-P(陈新平), Jiang R-F(江荣风). Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement. *Acta Pedol Sin* (土壤学报), 2008, 45(5): 915–924 (in Chinese with English abstract)
- [21] Jiang C-L(姜灿烂), He Y-Q(何园球), Li H-X(李辉信), Li C-L(李成亮), Liu X-L(刘晓利), Chen P-B(陈平帮), Wang Y L(王艳玲). Effect of long-term inorganic fertilization on soil nutrient and structure and peanut yield in upland red soil. *Acta Pedol Sin* (土壤学报), 2009, 46(6): 1102–1109 (in Chinese with English abstract)
- [22] Wang Y-L(王宜伦), Miao Y-H(苗玉红), Tan J-F(谭金芳), Han Y-L(韩燕来), Wang Q(汪强). Effects of different potassium fertilizer application rates on yield, K-efficiency of winter wheat and soil available K balance in Sandy Chao soil. *Chin J Soil Sci* (土壤通报), 2010, 41(1): 160–163 (in Chinese with English abstract)
- [23] Tang X, Shi X J, Ma Y B, Hao X. Phosphorus efficiency in a long-term wheat–rice cropping system in China. *J Agric Sci*, 2011, 149, 297–304
- [24] Liao Y-L(廖育林), Zheng X(郑圣先), Nie J(聂军), Dai P-A(戴平安). Potassium efficiency and balance of the rice–rice cropping system in different types of ecosystems. *Chin J Soil Sci* (土壤通报), 2008, 45(5): 915–924 (in Chinese with English abstract)
- [25] Liao Y-L(廖育林), Zheng S-X(郑圣先), Lu Y-H(鲁艳红), Yang Z-P(杨曾平), Nie J(聂军), Xie J(谢坚). Effects of long-term application of fertilizer and rice straw on potassium fixation of red-dish paddy soil. *J Soil Water Conserv* (水土保持学报), 2011, 25(1): 70–73 (in Chinese with English abstract)