植物营养与肥料学报 2012,18(4):884 -892
Plant Nutrition and Fertilizer Science

基于几何方法评价长期施用化肥坡耕地作物轮作系统可持续性

李 强[1], 许明祥[1,2*], 刘国彬[1], 齐治军[2], 王恒威[2]
(1 中国科学院水利部水土保持研究所,黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西杨凌 712100;
2 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为了评价长期施用化肥条件下黄土丘陵区坡耕地作物轮作系统的可持续性,本文基于三角形面积法,采样测定了长期施肥试验小区(17 年)的土壤理化属性及作物产量,将所测定的 18 项指标划分并转化为土壤物理指数、养分指数和作物指数,并计算出可持续性指数(三角形面积)。结果表明, 1)与对照(N0P0)相比,长期施用化肥可以提高系统的可持续性,物理指数、养分指数、作物指数及可持续性指数平均增加 16.0%、15.8%、64.1% 和 76.9%; 2)单施氮、磷处理,可持续性指数随着施肥量的增加(N0P0→N1P0\N0P1→N2P0\N0P2)而增加,分别较对照(0.66)增加了 13.6%、68.2% 和 68.3%、81.8%,但低于临界值(1.3)42.3%、14.6% 和 14.6%、7.7%,说明单施化肥处理的坡耕地作物轮作系统不可持续; 3)氮磷配施可持续性指数平均比临界值(1.3)高 39.2%,坡耕地作物轮作系统具有较好的可持续性。系统可持续顺序依次为 N1P2(2.15) > N2P1(1.88) > N2P2(1.62) > N1P1(1.57)。处理 N1P2(施 N 55.2 kg/hm^2,P_2O_5 90 kg/hm^2)是该研究区坡耕地可持续作物轮作系统的最优化肥施用配比。

关键词: 长期定位试验; 化肥; 坡耕地; 几何方法; 可持续性指数
中图分类号: S152; S158　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1008-505X(2012)04-0884-09

Evaluation of crop rotation system sustainability in slope land under long-term chemical fertilization based on geometry method

LI Qiang[1], XU Ming-xiang[1,2*], LIU Guo-bin[1], QI Zhi-jun[2], WANG Heng-wei[2]
(*1 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources/ State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Yangling, Shaanxi 712100, China;*
2 College of Resource and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: To evaluate the sustainability of crop rotation system in the cultivated slope land under 17-year continuous chemical fertilization condition in the Loess Hilly Region, in the present study, based on the method of area of triangle, 18 indicators (both soil and crop components) were selected, determined and classified as well as transformed into the three kinds of indexes including the soil physical index, the soil nutrient index and the ground-above crop index. Then, the sustainability index (namely area of triangle) was calculated to assess the status of the crop rotation system with the three indexes according to the triangle method. The results indicated that, there existed an improvement in the system sustainability with the fertilization treatment as compared to the control of N0P0, which did not receive any fertilizer. The determined indexes were all increased in various degrees with the physical index of 16.0%, nutrient index of 15.8%, crop index of 64.1% and the sustainability index of 76.9%. Along with the increment of single fertilization input (N0P0→N1P0\N0P1→N2P0\N0P2), the sustainability index

收稿日期: 2011-10-26　　**接受日期:** 2011-12-15
基金项目: 国家自然科学基金(41171422, 40971174); 中科院战略性先导专项子课题(XDA05050504);
中科院"西部之光"人才培养计划项目资助。
作者简介: 李强(1986—),男, 陕西子洲人,博士研究生, 主要研究侵蚀环境土壤质量演变。E-mail: liqiang1011@gmail.com
*通讯作者 Tel: 029-87012411, E-mail: xumx@nwsuaf.edu.cn

increased by 13.6%, 68.2% and 68.3%, 81.8%, respectively in comparison with the control of N0P0, while far less than the threshold of 1.3 (42.3%, 14.6% and 14.6%, 7.7%, respectively). Thus, the treatment of single-chemical fertilization was not sustainable in the studied site. However, the treatments of combined with nitrogen and phosphor held a preferable sustainability, in which the sustainability index was averagely 39.2% more than the critical value (1.3). The rank of the crop rotation system sustainability was N1P2 (2.15) > N2P1 (1.88) > N2P2 (1.62) > N1P1 (1.57). Therefore, the N1P2 (N 55.2 kg/ha, P_2O_5 90 kg/ha) was the optimal chemical fertilizer-applied treatment in the research area.

Key words: long-term field experiment; chemical fertilizer; slope cultivated land; geometry method; sustainability index

农业系统可持续发展是从可持续发展的内涵和目标出发，通过协调人地关系，促进农业增产、改善农业环境和提高农村社会经济等子系统可持续性，建立区域农业可持续发展道路[1]。土壤是农业生产的主要自然资源，以土壤为中心由土壤与其环境条件组成的土壤生态系统的好坏决定了农业的可持续发展[2]。

土壤管理是实现农业系统可持续利用的关键措施[3]。合理施肥是提高作物产量和提升土壤质量的重要管理方式[4]。研究表明，农田施有机肥、有机无机配施是黄土丘陵区作物增产、土壤保育的主要途径[5-6]。然而，近年来该区因退耕禁牧导致有机肥源严重不足、新型肥料推广困难、以及基本农田建设加强等现象使得化肥在未来一定时期内仍将是当地农民的首选肥料[7-8]。许多研究认为长期施用化肥对土壤质量和生产力表现出正面影响，化肥对作物增产的贡献为40%～60% [9-11]。但也有研究发现连续施用化肥会引起土壤结构破坏[12]、养分有效性降低[13]和作物产量及其稳定性下降[9,14]。这可能与区域环境条件、土壤肥力基础、施肥水平、耕作管理方式以及作物特性等差异性有关[15]。

坡耕地是黄土丘陵区最典型的一种农业用地，由于其在粮食生产中的重要地位，有关该区侵蚀与坡耕地生产力的关系[16]、坡改梯与土地生产力的关系[17]、水资源利用及施肥处理与坡耕地粮食生产的关系等[6,18]方面的研究已经开展较多。但目前关于长期施用化肥条件下坡耕地农业系统是否可持续尚不得而知。因此，先后有学者将土壤质量指数[19]、相对产量[14]、农业生产可持续指数[1]、产量可持续性指数(sustainable yield index, SYI)[20]等指标用来评价不同养分管理系统可持续性。这些评价方法易于理解和操作，但评价结果倾向性较大(土壤或作物)，不能客观反映农业系统的可持续性。鉴于此，本文借助中国科学院安塞水土保持综合试验站长期施肥定位小区，基于三角形面积法，尝试将土壤、作物指标结合起来，将所测定的18项指标划分并转化为土壤物理指数、土壤养分指数和作物指数三类并以此结果计算出可持续性指数(三角形面积)。旨在评价长期施用化肥对坡耕地作物轮作系统可持续性的影响，选取一种较为科学的施肥方案，为该区坡地农业可持续发展提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究在中国科学院安塞水土保持综合试验站进行。研究区属典型的黄土丘陵沟壑区，气候属暖温带半干旱季风气候。平均海拔1200 m，相对高差100～300 m，年均气温8.8℃，年均降水量505.3 mm，无霜期160 d左右。地带性土壤为黑垆土，由于严重的水土流失，黑垆土损失殆尽，土壤以黄土母质上发育的黄绵土(钙质干润雏形土)为主，土壤质地为粉砂壤土，耕层土壤容重1.15～1.35 g/cm^3，pH 8.4～8.6，有机质含量3.5～4.8 g/kg。

试验于1992年布设在安塞站坡耕地上，土壤基本性质：pH 8.70，有机质含量3.57 g/kg，全氮0.24 g/kg，全磷0.55 g/kg，碱解氮19.14 mg/kg，速效磷4.4 mg/kg，速效钾64.5 mg/kg，坡度19°，坡向正东。小区面积34×20=740 m^2，共10个处理，二次重复，2×3两因素三水平完全随机设计。处理分别为：裸地(BL)、N0P0、N0P1、N0P2、N1P0、N1P1、N1P2、N2P0、N2P1、N2P2。裸地(BL)为无作物也不施肥。氮肥为尿素，N0为不施氮，N1每年施纯氮55.2 kg/hm^2，N2每年施纯氮110.4 kg/hm^2。磷肥为三料磷肥，P0为不施磷肥，P1每年施磷量(P_2O_5)为45 kg/hm^2，P2每年施磷量(P_2O_5)为90 kg/hm^2。作物为谷子→糜子→谷子→黄豆轮作，采样年度种植谷子。

1.2 样品采集与测定

土壤样品于2009年10月谷子收割前采集,为了提高研究结果的可靠性,分别将每个小区划分为两个微区,每个微区挖取土壤剖面采样(0—15 cm)。土样带回室内风干(原状土用铝盒存放带回室内测定团聚体),剔除根系、石块等杂物。研磨过筛(1 mm和0.25 mm)测定12项土壤理化属性。其中物理性质指标包括孔隙度、粉粒含量(MS2000激光粒度仪-马尔文法)[21]、土壤比表面积(soil specific area)[22][简写为SSA,SSA = 0.05(Sa%) + 4.0(Si%) + 20(Cl%),其中:SSA为土壤比表面积,Sa为砂粒(2 mm～50 μm),Si为粉粒(50～2 μm),Cl为粘粒(<2 μm)在土壤中所占的百分数]、团聚体含量(改进的Yoder法)[23]、团聚体平均质量直径(MMD)[24][$MWD = \sum_{i=1}^{n}(\bar{R}_i w_i / \sum_{i=1}^{n} w_i) / \sum_{i=1}^{n} w_i$,式中:$\bar{R}_i$是某级团聚体的平均直径,$W_i$是该级别团聚体占土壤样品总量的质量百分含量]。养分指标包括有机质、全氮、全磷、有效氮、有效磷、速效钾、阳离子交换量(CEC)。作物指标包括产量、地上生物量、千粒重及植株(包括籽粒、谷叶、谷杆、谷糠)中全氮、全磷和全钾含量6项。除标注参考文献的土壤性质外,其它均按照常规方法测定[25]。数据处理用SPSS 13.0软件完成,差异显著性检验采用LSD法($P < 0.05$,双尾)。

1.3 参数确定及方法

本文选取了18项评价指标(5项物理指标,7项养分指标和6项作物指标)建立最小数据集来评价作物轮作系统的可持续性。土壤物理指数(PI_i)、养分指数(NI_i)、作物指数(CI_i)及可持续性指数的计算采用以下公式[26]:

$$I_{ij} = \frac{A_{ij}}{Th_{ij}} \quad (1)$$

$$PI_{ij} = \frac{1}{5}\sum_{j=1}^{5} I_{ij} \quad (2)$$

$$NI_{ij} = \frac{1}{7}\sum_{j=1}^{7} I_{ij} \quad (3)$$

$$CI_{ij} = \frac{1}{6}\sum_{j=1}^{6} I_{ij} \quad (4)$$

式(1)中,I_{ij}为第i个处理第j个参数的指数数值;A_{ij}指第i个处理第j个参数的实测值;Th_{ij}是第j个参数的临界值。指标临界值的确定:作物产量和生物量以各个处理的算术平均值的1.2倍为准[27],其它指标均采用不同施肥处理数值的算术平均值。式(2)中,PI_{ij}是物理指数值,j是研究中的物理指标数量。式(3)中,NI_{ij}是养分指数值,j是研究中的养分指标数量。式(4)中,CI_{ij}是作物指数值,j是研究中的作物指标数量。

作物系统可持续性指数按公式(5)求得。

系统可持续性指数 = 三角形面积($S\Delta_{ABC}$) = $S\Delta_{AOB} + S\Delta_{BOC} + S\Delta_{COA} = 1/2\ ab\sin(120°) + 1/2\ bc\sin(120°) + 1/2\ ca\sin(120°) = \frac{\sqrt{3}}{4}(ab + bc + ca)$ (5)

式(5)中,a,b,c是从点O出发的三条不同长度的线段,分别代表物理指数、养分指数和作物指数。然后连接三条线段的另一端点组成三角形(见图1)。

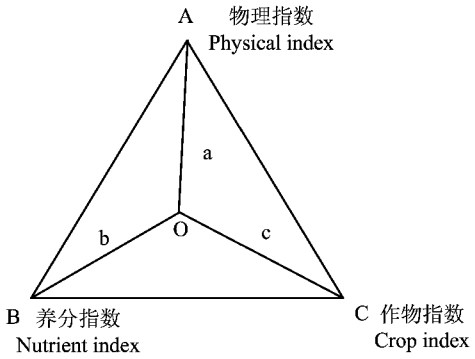

图1 三角形方法测定系统可持续性

Fig.1 Measurement of sustainability of system with triangle method

为了达到系统的可持续性,每个参数最终的计算值应该等于或者大于指标临界值。同时,所选指标应该与系统可持续性成正相关关系[23]。根据计算得到的可持续性指数确定该系统的可持续性及其可持续程度。可持续性指数应该大于或等于1.3(当a,b和c均为1时),否则视为本系统不可持续。可持续性指数越大表示系统的可持续性越强。

2 结果与分析

2.1 长期施用化肥对土壤物理性质的影响

土壤物理性质不仅影响土壤保持和供应水肥的能力,对调控土壤气热状况和植物生长也有重要作用。由表1可以看出,与对照(处理N0P0)相比,长期施用化肥能够通过影响孔隙组成、土壤颗粒大小而改变土壤物理环境[15]。方差分析表明,土壤团聚体和比表面积(SSA)得到显著增加,平均增加

161.0% 和 6.8%。土壤团聚体平均重量直径(MMD)增加约 11.5%。与单施化肥处理相比，氮磷配施土壤孔隙度略有增加(0.3%)。土壤团聚体、MMD、SSA 和粉粒含量分别增加 16.6%、26.1%、4.6% 和 7.8%。不同施肥处理之间，土壤团聚体及 MMD 变异系数分别是 25.4% 和 22.9%，均达到中等变异(CV = 10% ~ 100%)；而土壤孔隙度、比表面积和粉粒含量在各施肥处理之间呈弱变异(CV < 10%)。可见，长期施用化肥、尤其是氮磷配施有利于改善研究区土壤物理性状，且不同施肥处理对土壤团聚体的影响较孔隙度和颗粒组成大。

表 1　土壤物理指标属性及其临界值

Table 1　Soil physical indicators and their thresholds

处理 Treatment	孔隙度 Porosity (%)	团聚体 Aggregate (%)	团聚体平均重量直径 Mean weight diameter (mm)	比表面积 Specific surface area (cm^2/g)	粉粒 Silt (%)
N2P2	54.19(1.16)	40.34(2.10)	2.80(0.83)	424.63(4.88)	65.68(2.03)
N2P1	53.64(0.31)	48.55(3.26)	3.71(0.26)	427.81(3.12)	68.17(0.93)
N2P0	54.40(0.41)	33.91(2.83)	1.68(0.34)	422.05(3.83)	66.54(0.79)
N1P2	54.83(0.73)	42.81(2.97)	3.24(0.40)	433.93(6.79)	63.69(1.07)
N1P1	54.36(0.83)	35.50(4.65)	2.39(0.06)	400.45(3.54)	62.79(1.22)
N1P0	54.03(0.42)	28.10(2.33)	2.06(0.21)	399.45(4.98)	60.77(2.01)
N0P2	54.21(0.91)	40.40(3.25)	2.80(0.23)	387.25(5.07)	59.75(1.23)
N0P1	53.79(0.15)	41.00(2.36)	3.09(0.10)	404.50(1.99)	54.37(2.57)
N0P0	54.93(0.47)	14.90(0.83)	2.44(0.25)	386.39(4.02)	60.14(2.00)
BL	52.68(1.03)	7.40(1.11)	2.00(0.62)	354.68(2.87)	55.04(1.13)
临界值 Threshold	54.2	38.8	2.72	412.5	62.7
P 值 P-value	0.61	0.02	0.61	0.01	0.01
变异系数 CV(%)	0.79	25.4	22.9	4.33	6.71

注(Note)：BL—裸地 Bare land；括号中的数据为标准误 Numbers within parentheses are SE of the means.

2.2　长期施用化肥对土壤养分的影响

表 2 显示，与对照(N0P0)相比，长期施用化肥后土壤养分含量(除全磷)均有不同程度的增加趋势。其中土壤有效磷增幅最大(平均增幅约 3.52 倍)，土壤有机质和全氮也显著增加，分别增加了 17.7% 和 19.2%。土壤有效氮、速效钾和 CEC 略有增加，但未达到显著水平。表明长期施用化肥能够促进土壤养分的缓慢积累[11]。

单施化肥处理，随着施肥量的增加(N0P0→N1P0\N0P1→N2P0\N0P2)，土壤有机质、速效氮和 CEC 较对照均有不同程度的提高。与单施磷肥相比，施用氮肥更有利于有机质的积累。高水平单施氮肥处理(N2P0)土壤有机质比施磷(N0P2)土壤中高出 7.1%。

与单施化肥处理相比，氮磷配施处理对土壤养分的累积效果更加明显，平均增加有机质 2.8%、全氮 6.9%、有效氮 13.1%、速效磷 66.2% 和 CEC 1.2%。尤其是处理 N1P2 对土壤养分的累积最为突出，其次是 N2P1 > N1P1 > N2P2 处理。

总之，长期施用化肥一定程度上能够改善土壤养分状况[28]。单施氮(磷)肥容易导致土壤磷(氮)素亏缺。氮磷配施处理后土壤养分保持稳定或增加趋势，这一现象在肥料配施，尤其是 N1P2 处理下表现的最为突出。

2.3　长期施用化肥对作物生产力的影响

作物产量及其地上部作物基本特征(如生物量、千粒重等)是土壤生产力的外在表现，能够确切反映土壤生产力水平，可作为土壤肥力评价结果的验证依据[29]。由表 3 可以看出，与对照相比，施肥

表2 土壤化学指标属性及其临界值

Table 2 Soil chemical indicators and their thresholds

处理 Treatment	有机质 Org. matter (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	全磷 Total P (g/kg)	有效氮 Available N (mg/kg)	有效磷 Available P (mg/kg)	速效钾 Available K (mg/kg)	CEC (cmol/kg)
N2P2	4.68(0.23)	0.34(0.02)	0.55(0.02)	28.56(4.72)	23.27(4.31)	70.50(5.23)	56.45(1.17)
N2P1	5.18(0.17)	0.38(0.03)	0.66(0.01)	30.52(0.52)	13.08(2.23)	68.03(4.88)	54.94(2.24)
N2P0	5.34(0.14)	0.38(0.03)	0.61(0.01)	31.36(0.94)	1.99(0.21)	62.98(5.07)	55.33(1.00)
N1P2	5.76(0.26)	0.41(0.01)	0.74(0.03)	32.20(1.37)	24.63(4.02)	61.83(4.21)	54.37(1.19)
N1P1	5.40(0.21)	0.36(0.02)	0.56(0.02)	30.80(1.66)	9.36(1.02)	65.21(3.22)	53.02(1.34)
N1P0	4.88(0.19)	0.32(0.03)	0.63(0.02)	25.76(3.15)	1.50(0.00)	64.02(2.23)	53.65(0.96)
N0P2	5.03(0.10)	0.34(0.01)	0.91(0.05)	22.96(1.83)	20.99(3.02)	64.15(1.00)	53.57(2.17)
N0P1	5.06(0.22)	0.33(0.02)	0.53(0.03)	24.36(0.42)	10.85(0.87)	77.06(6.02)	53.15(2.89)
N0P0	4.39(0.26)	0.30(0.02)	0.69(0.02)	26.04(2.21)	2.92(0.12)	65.48(2.98)	53.22(1.01)
BL	4.13(0.08)	0.29(0.01)	0.54(0.01)	21.00(0.73)	1.72(0.16)	62.68(3.79)	51.07(0.99)
临界值 Threshold	5.17	0.36	0.65	28.32	13.21	66.72	54.31
*P*值 *P*-value	0.04	0.02	0.07	0.03	0.02	0.49	0.45
变异系数 *CV*(%)	6.49	8.56	19.35	12.40	68.65	7.54	2.20

注(Note): BL—裸地 Bare land; 括号中的数据为标准误 Numbers within parentheses are SE of the means.

处理显著增加了作物产量、生物量及千粒重,增幅在180.6%～231.6%,平均增加192.9%。不同施肥处理之间对作物指标的影响差异也较大,变异系数在37.3%～46.5%之间(除千粒重),平均为42.8%,均达到中等变异水平(*CV*=10%～100%)。

与对照(N0P0)相比,单施氮肥处理,随着施氮量的增加(N0P0→N1P0→N2P0),作物产量、生物量及植株养分吸收量均呈增加趋势,增幅为18.7%～42.7%和101.9%～182.7%。而单施磷肥处理,随着施磷量的增加(N0P0→N0P1→N0P2)作物产量、生物量、千粒重及植株养分吸收量均呈先迅速增加而后下降的趋势,这可能与氮磷养分比例失调有关[28-29]。与单施氮、磷肥处理相比,氮磷配施具有较强的增产优势,作物产量、生物量和千粒重平均增加129.8%、89.8%和3.8%,植株对相应元素的吸收量显著高于单施氮、磷处理,表明氮、磷肥之间具有相互促进吸收的作用[30]。

综上所述,长期施用化肥不仅能够显著增加作物产量、生物量及千粒重,还显著提高了植株对土壤养分的吸收利用。氮肥单施增产效果优于磷肥处理,但显著低于氮磷配施处理。

2.4 长期施用化肥对可持续性指数的影响

不同施肥处理下土壤物理指数、养分指数、作物指数及可持续性指数见表4。与对照(N0P0)相比,长期施用化肥处理的土壤物理指数、养分指数、作物指数及可持续性指数均表现为正效应,分别比对照增加16.0%、15.8%、64.1%和76.9%,表明施肥处理与对照相比具有更好的可持续性。

与对照(N0P0)的可持续性指数(0.66)相比,单施化肥处理随着施肥量的增加(N0P0→N1P0\N0P1→N2P0\N0P2),可持续性指数分别增加13.6%、68.2%和68.3%、81.8%,但低于临界值(1.3)42.3%、14.6%和14.6%、7.7%,表明单施化肥处理与对照相比具有更好的可持续性,但在该作物轮作系统中不可持续。

表 3　作物指标属性及临界值

Table 3　Crop indicators and their thresholds

处 理 Treatment	产 量 Yield (kg/hm^2)	生物量 Biomass (g/m^2)	千粒重 1000-grain wt. (g)	植株全氮 Total N in plant (mg/m^2)	植株全磷 Total P in plant (mg/m^2)	植株全钾 Total K in plant (mg/m^2)
N2P2	1742.1(50.29)	331.3(9.56)	3.05(0.10)	303.80(8.77)	400.59(11.56)	203.22(5.87)
N2P1	1631.5(47.10)	381.8(11.02)	3.00(0.06)	297.70(8.59)	703.95(20.32)	273.15(7.89)
N2P0	844.40(24.38)	238.2(6.88)	2.94(0.09)	187.40(5.41)	481.58(13.90)	161.75(4.67)
N1P2	1636.6(47.24)	454.1(13.11)	3.06(0.04)	455.50(13.15)	508.20(14.67)	361.25(10.43)
N1P1	1675.9(48.38)	382.6(11.04)	2.98(0.03)	327.90(9.47)	534.83(15.44)	295.34(8.53)
N1P0	566.10(16.34)	119.1(3.44)	2.91(0.07)	109.50(3.16)	187.38(5.41)	112.57(3.25)
N0P2	740.70(21.38)	200.8(5.80)	3.00(0.10)	193.40(5.58)	176.60(5.10)	179.10(5.16)
N0P1	758.60(21.90)	205.5(5.93)	2.95(0.12)	194.50(5.61)	246.00(7.10)	175.67(5.07)
N0P0	418.30(12.08)	89.8(2.59)	2.89(0.07)	92.20(2.66)	132.55(3.83)	78.89(2.28)
BL	—	—	—	—	—	—
临界值 Threshold	1439.39	151.61	2.99	258.71	404.89	220.26
P 值 *P*-value	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
变异系数 *CV* (%)	42.64	45.56	1.81	42.04	46.45	37.32

注(Note): BL—裸地 Bare land; 括号中的数据为标准误 Numbers within parentheses are SE of the means.

表 4　不同施肥处理可持续性指数

Table 4　Sustainability indices in different treatments of long-term fertilization experiment

处 理 Treatment	物理指数 Physical index	养分指数 Nutrient index	作物指数 Crop index	可持续性指数 Sustainability index
N2P2	1.03	1.08	1.25	1.62
N2P1	1.15	1.02	1.46	1.88
N2P0	0.92	0.89	0.96	1.11
N1P2	1.07	1.19	1.64	2.15
N1P1	0.95	0.95	1.44	1.57
N1P0	0.88	0.82	0.59	0.75
N0P2	0.99	1.10	0.81	1.20
N0P1	1.01	0.93	0.84	1.11
N0P0	0.84	0.84	0.48	0.66
BL	0.73	0.74	—	—
平均值 Mean	1.00	1.00	1.12	1.43
变异系数 *CV*(%)	8.50	12.02	45.39	41.33

注(Note): BL—裸地 Bare land.

与单施化肥相比,氮磷配施可持续性指数平均增加74.0%,高出临界值(1.3)39.2%,且各个处理之间差异较大,大小顺序依次是N1P2(2.15) > N2P1(1.88) > N2P2(1.62) > N1P1(1.57)。表明氮磷配施处理具有较好的可持续性,其中处理N1P2是研究区坡地农业系统的最佳化肥施用模式。

3 讨论

目前关于农业系统可持续的研究方法较多,比较常用的有经验评估法、主导指标评价法、多指标综合指数法、模糊数学模型法和其他方法[31-32]。这些方法能够较好地结合系统内外因素对农业系统可持续性的影响、关键指标的识别及可持续性的预测。但大部分方法涉及因素较多、指标之间信息重叠量大、可操作性差。因此,在利用这些方法评价农业系统可持续的过程中,数据需要通过权重转化,容易导致评价结果失真,不能客观反映农业系统可持续性。当前长期施肥农业系统的可持续研究主要倾向于土壤性质的演变、土地生产力的变化及其对农业生态环境的影响三个方面。先后有学者将土壤质量指数[19]、相对产量[14]、农业生产(环境生态、社会经济)可持续指数[1]、产量可持续性指数(sustainable yield index,SYI)[20]等指标用来评价不同养分管理系统可持续性。许多研究认为土壤是作物生长的物质基础,土壤质量指数的大小是评价农业系统可持续的重要指标[15,29],而其他研究则发现作物产量虽不是土壤属性,但却是土壤实际生产力的外在表现。在一定程度上能够确切反映土壤生产力水平,可作为土壤肥力评价结果的直接验证依据,并将SYI视为是衡量系统是否能持续生产的一个重要参数,SYI值越大,系统的可持续性越好[20]。鉴于此,本文利用坡地长期施肥定位试验小区,尝试将土壤、作物指标结合起来,将所选的18项指标划分为土壤物理指标、土壤养分指标和作物指标,在此基础上,借助三角形面积法建立了作物系统的可持续性指数(sustainability index)。如果仅考虑土壤物理性质,处理N2P1可能是研究区的最佳施肥模式(表4)。这与我们采用传统评价方法的研究结果一致[15]。当从土壤养分或作物生产力角度出发,N1P2是该区较优的施肥方案。相对于单因素评价法而言,三角形面积法充分地结合了土壤和作物指标属性,能够较好地评价长期施用化肥对研究区作物轮作系统的可持续性。

本研究表明,长期施用化肥可不同程度地提高该作物系统的可持续性指数值,并以处理N1P2可持续性指数最高(2.15),大小顺序依次是N1P2(2.15) > N2P1(1.88) > N2P2(1.62) > N1P1(1.57)处理。而化肥单施或不施化肥处理可持续性指数较低,系统不可持续。经过对研究区近7年各个施肥处理的作物产量和土壤有机质的动态研究发现,化肥配施效果高于化肥单施或不施化肥处理(图2)。这与已有的研究结果一致。如Kong等[26]在印度设置5块不同施肥措施样地,研究发现,化肥配施效果高于化肥单施,且不合理的施肥模式将导致农业系统养分不均衡,可持续性差。俄胜哲等[9]对河西绿洲25年连续施肥试验研究发现,随着试验年限的延长,单施氮肥处理土壤磷素等营养元素消耗增大,产量急剧下降,逐渐接近长期不施肥处理。氮、磷肥配合施用使作物产量稳定性大幅增加。

变异系数是反映不同试验处理效应的重要参数[26]。从表1至表4可以看出,作物指标的变异性(平均39.9%)大于养分指标(平均17.9%)和物理

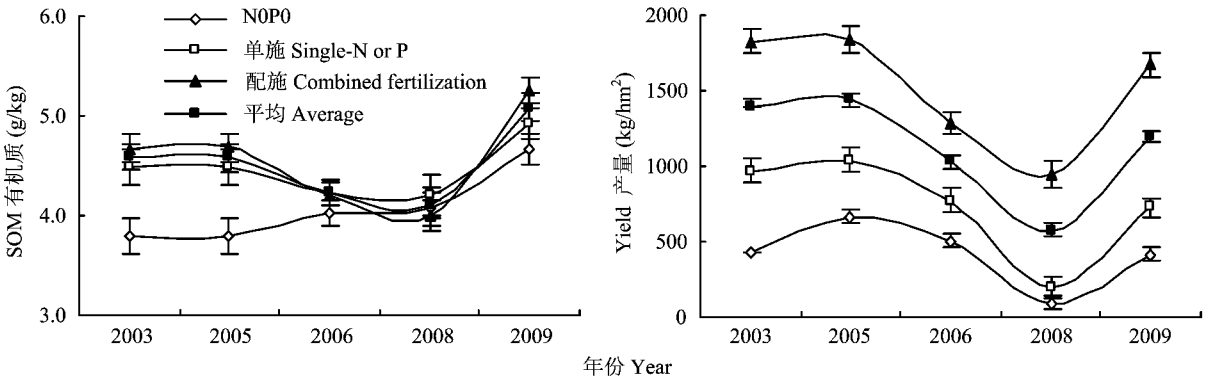

图2 长期施用化肥对土壤有机质和作物产量的影响

Fig.2 Effect of long-term chemical fertilization on soil organic matter(SOM) and crop yield

指标(平均 12.0%)的变异性，表明作物指标属性能够较好地用来评价不同施肥处理下作物系统的可持续性。尽管土壤物理性质的变化、养分的缓慢积累在长期施肥作物系统可持续评价中不容忽视，作物指标属性在评价长期培肥土壤的农作系统中仍可作为直接验证依据。

4 结论

1）长期施用化肥可以提高研究区农业系统的可持续性。物理指数、养分指数、作物指数及可持续性指数平均增加 16.0%、15.8%、64.1% 和 76.9%。

2）单施氮(磷)肥处理，可持续性指数随着施肥量的增加而增加，但低于可持续性临界值。单施化肥处理的坡耕地作物轮作系统经过 17 年后仍未达到可持续水平。

3）氮磷配施处理的可持续性指数高出临界值 39.2%，坡耕地作物轮作系统具有较好的可持续性。处理 N1P2 即施纯 N 55.2 kg/hm^2，P_2O_5 90 kg/hm^2 是研究区坡耕地可持续作物轮作系统的最优化肥施用配比。

参 考 文 献：

[1] 刘玉杰，吴映梅，邓福英. 中国农业可持续指数评价及类型区划分[J]. 地域研究与开发，2008，28(4)：110-114.
Liu Y J, Wu Y M, Deng F Y. Type classification and evaluation of agricultural sustainable development index in China[J]. Areal Res. Dev., 2008, 28(4): 110-114.

[2] 赵其国. 土壤圈物质循环研究与土壤学的发展[J]. 土壤，1991，23(1)：1-3.
Zhao Q G. Material recycling in pedosphere and development trend of soil science[J]. Soils, 1991, 23(1): 1-3.

[3] Tarinder Kaur B S B, Dhillon N S. Soil organic matter dynamics as affected by long-term use of organic and inorganic fertilizers under maize-wheat cropping system [J]. Nutr. Cycl. Agroecosyst., 2008, 81: 59-69.

[4] 廖育林，郑圣先，聂军，等. 长期施用化肥和稻草对红壤水稻土肥力和生产力持续性的影响[J]. 中国农业科学，2009，42(10)：3541-3550.
Liao Y L, Zheng S X, Nie J *et al*. Effects of long-term application of fertilizer and rice straw on soil fertility and sustainability of a reddish paddy soil productivity[J]. Sci. Agric. Sin., 2009, 42(10): 3541-3550.

[5] 陈奇伯，齐实. 宁南黄土丘陵区坡耕地土壤侵蚀对土地生产力影响研究[J]. 北京林业大学学报，2001，23(1)：34-37.
Chen Q B, Qi S. Impact of soil erosion on soil productivity of sloping field in hilly-gully region of Loess Plateau in south Ningxia [J]. J. Beijing For. Univ., 2001, 23(1): 34-37.

[6] 赵护兵，刘国彬，吴瑞俊. 黄土丘陵区不同类型农地的养分循环平衡特征[J]. 农业工程学报，2006，22(1)：58-64.
Zhao H B, Liu G B, Wu R J. Nutrient cycling and balance characteristics of different farmland types in the Loess Hilly Region [J]. Trans. Chin. Soc. Agric. Eng., 2006, 22(1): 58-64.

[7] 吴飞，濮励志，许艳，等. 耕地入选基本农田评价与决策[J]. 农业工程学报，2009，25(12)：270-276
Wu F, Pu L Z, Xu Y *et al*. Evaluation and decision-making for selecting cultivated land into prime farmland[J]. Trans. Chin. Soc. Agric. Eng., 2009, 25(12): 270-276.

[8] 赵秉强，张福锁，廖宗文，等. 我国新型肥料发展战略研究[J]. 植物营养与肥料学报，2004，10(5)：536-545.
Zhao B Q, Zhang F S, Liao Z W *et al*. Research on development strategies of fertilizer in China[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2004, 10(5): 536-545.

[9] 俄胜哲，杨生茂，郭永杰，等. 长期施肥对河西绿洲灌漠土作物产量及土壤养分自然供给能力的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2010，16(4)：786-793.
E S Z, Yang S M, Guo Y J *et al*. Effects of long-term fertilization on crop yield and indigenous soil nutrient supply in Hexi Oasis of Gansu Province[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2010, 16(4): 786-793.

[10] Zhao B, Li L, Shi X *et al*. Long-term fertilizer experiment network in China: crop yields and soil nutrient trends [J]. Agron. J., 2010, 102(1): 216-224.

[11] 王慎强，蒋其鳌，钦绳武，顾益初. 长期施用有机肥与化肥对潮土土壤化学及生物学性质的影响[J]. 中国生态农业学报，2001，9(4)：67-69.
Wang S Q, Jiang Q A, Qian S W, Gu Y C. Effect of long-term use of organic manure and chemical fertilizers on fluvo-aquic soils physical quality[J]. Chin. J. Eco-Agric., 2001, 9(2): 77-78.

[12] Su Y Z, Wang F, Suo D R *et al*. Long-term effect of fertilizer and manure application on soil-carbon sequestration and soil fertility under the wheat-wheat-maize cropping system in northwest China[J]. Nutr. Cycl. Agroecosyst., 2006, 75(3): 285-295.

[13] 赵云英，谢永生，郝明德. 黄土旱塬小麦长期施肥的产量效应及土壤肥力变化[J]. 西北农业学报，2007，16(5)：75-79，88.
Zhao Y Y, Xie Y S, Hao M D. Yield effects and soil fertility evolution of long-term application of fertilizer on wheat in dry land of Loess Plateau[J]. Nortwest China J. Agric. Sci., 2007, 16(5): 75-79, 88.

[14] Sarawad I, Sing D. Effect of long term fertilizer use on yield and nitrogen uptake by maize-wheat-cowpea sequence[J]. J. Agric. Sci., 2010, 17(4): 117-125.

[15] 李强，许明祥，齐志军，等. 长期施用化肥对黄土高原坡耕地土壤物理性质的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2011，17(1)：103-109.
Li Q, Xu M X, Qi Z J *et al*. Effects of long-term chemical fertilization on soil physical properties of slope lands in the Loess

Hilly Region[J]. Plant Nutr. Fert. Sci, 2011, 17(1): 103-109.

[16] 陈奇伯，王克勤，齐实，等. 黄土丘陵区坡耕地水土流失与土地生产力的关系[J]. 生态学报，2003，23(8)：1463-1469.
Chen Q B, Wang K Q, Qi S *et al*. Soil and water erosion in its relation to slope field productivity in hilly gully areas of the Loess Plateau[J]. Acta Ecol. Sin., 2003, 23(8): 1463-1469.

[17] 刘志刚. 坡改梯对我国经济可持续发展的影响和对策[J]. 中国水土保持科学，2011，4(2)：123-129.
Liu Z G. Impacts and strategies of farmland terracing on the economic sustainable development in China[J]. Soil Water Conserv. Sci. China, 2011, 4(2): 123-129.

[18] 王立祥，王留方，范芳强. 西北黄土高原半千旱—半湿润地区旱作农田降水生产潜力及开发途径[J]. 自然资源学报，1989，4(1)：19-26.
Wang L X, Wang L F, Fan F Q. The productivity potential of precipitation of dry farming and its exploration in the semiarid and subhumid areas of northwestern Loess Plaetau[J]. J. Nat. Resour., 1989, 4(1): 19-26.

[19] Lal R, Stewart B A. Food security and soil quality[M]. Boca Raton, Fl: CRC Press, 2010. 137-208.

[20] 李忠芳，徐明岗，张会民，等. 长期施肥和不同生态条件下我国作物产量可持续性特征[J]. 应用生态学报，2010，21(5)：1264-1269.
Li Z F, Xu M G, Zhang H M *et al*. Sustainability of crop yields in China under long-term fertilization and different ecological conditions[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2010, 21(5): 1264-1269.

[21] Guo T L, Wang Q J, Li D Q, Wu L S. Sediment and solute transport on soil slope under simultaneous influence of rainfall impact and scouring flow[J]. Hydrol. Process., 2010, 24: 1446-1454.

[22] Foster G R, Yang R A, Neibling W H. Sediment composition for non-point source pollution analyses[J]. Transact ASAE, 1985, 28(1): 133-139,146.

[23] 安韶山，黄懿梅，郑粉莉. 宁夏黄土区不同植物群落土地利用方式对土壤质量的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2008，14(2)：300-307.
An S S, Huang Y M, Zheng F L. The changes of soil quality as affected by different land use in plant communities of Southern Ningxia loess hilly region[J]. Plant Nutr. Fert. Sci, 2008, 14(2): 300-307.

[24] 邱莉萍，张兴昌，张晋爱. 黄土高原长期培肥土壤团聚体中养分和酶的分布[J]. 生态学报，2006，26(2)：364-372.
Qiu L P, Zhang X C, Zhang J A. Distribution of nutrients and enzymes in Loess Plateau soil aggregates after long-term fertilization[J]. Acta Ecol. Sin., 2006, 26(2): 364-372.

[25] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法[M]. 北京：科学出版社，1978. 77-98.
Institute of Soil Science, Chinese of Academy Science. The determination method of soil physical properties[M]. Beijing: Science Press, 1978. 77-98.

[26] Kang G S, Beri V, Sidhu B S, Rupela O P. A new index to assess soil quality and sustainability of wheat-based cropping systems[J]. Biol. Fert. Soils, 2005, 41: 389-398.

[27] Gomez A A, Kelly D E S, Syers J K, Coughlan K J *et al*. Measuring sustainability of agricultural systems at the farm level[J]. Soil Sci., 1996, 49(8): 401-410.

[28] 唐旭，吴春艳，杨生茂，等. 长期水稻—大麦轮作体系土壤供氮能力与作物需氮量研究[J]. 植物营养与肥料学报，2011，17(1)：79-87.
Tang X, Wu C Y, Yang S M *et al*. Study on soil nitrogen supplying capacity and nitrogen requirements for crop under long-term rice-barley cropping system[J]. Plant Nutr. Fert. Sci, 2011, 17(1): 79-87.

[29] 高静，徐明岗，张会民，等. 长期施肥对我国6种旱地小麦磷肥回收率的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2009，15(3)：584-592.
Gao J, Xu M G, Zhang H M *et al*. Influence of long-term fertilizations on phosphorus recovery efficiency of wheat in six dry upland soils of China[J]. Plant Nutr. Fert. Sci, 2009, 15(3): 584-592.

[30] 袁亭亭，宋小艺，王忠宾，等. 嫁接与施肥对番茄产量及氮、磷、钾吸收利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2011，17(1)：131-136.
Yuan T T, Song X Y, Wang Z B *et al*. Effects of grafting cultivation and fertilization on the yield, N, P, K uptake and utilization of tomato[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2011, 17(1): 131-136.

[31] 李全胜，叶旭君. 农业生态系统可持续发展趋势度的评价方法研究[J]. 生态学报，2001，21(5)：695-700.
Li Q S, Ye X J. Study on assessing methods for the sustainable development trend of agroecosystem[J]. Acta Ecol. Sin., 2001, 21(5): 695-700.

[32] 翟胜，王巨媛，张二勋，等. 农业生态系统可持续性评价研究进展[J]. 地域研究与开发，2010，29(1)：124-129.
Zhai S, Wang J Y, Zhang E X *et al*. Review on evaluation of sustainable agro-ecosystem[J]. Areal Res. Dev., 2010, 29(1): 124-129.