

赵 旸, 李 卓, 刘 明, 等. 中国苹果主产区2006—2016年磷元素收支及其环境风险变化[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(12): 2779–2787.  
ZHAO Yang, LI Zhuo, LIU Ming, et al. Phosphorus budgets and their associated environmental risks in the main apple orchard areas in China from 2006 to 2016[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(12): 2779–2787.

## 中国苹果主产区2006—2016年磷元素收支及其环境风险变化

赵 旸, 李 卓, 刘 明, 肖 潇, 王重阳, 孙丹峰, 伦 飞\*

(中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100193)

**摘 要:**为探讨中国苹果主产区磷元素收支及其环境风险变化,更好地实现区域乡村振兴和生态文明建设。以中国苹果主产区为研究对象,基于物质流分析和磷足迹评价的方法,探讨了2006—2016年中国苹果主产区磷收支及其磷足迹情况;此外,结合灰水足迹和土壤环境风险评价指数,探讨了中国苹果主产区水土环境风险情况。研究表明,在2006—2016年,中国苹果主产区单位面积磷投入呈先增加后减少的趋势,而生产苹果的含磷量则呈现略微波动增加的趋势,这使得中国苹果主产区磷足迹也呈现出先增加后减少的变化趋势,这段时期内,中国苹果主产区磷投入总量(以P计)达到了184.86万t,总磷元素利用效率仅为3.95%;苹果主产区苹果种植的水环境风险在2006—2010年呈不断严重的趋势,但随后几年则有所改善,而土壤环境风险则均呈不断严重的趋势;中国不同区域的单位面积磷投入、磷足迹和环境风险呈现出一定的差异。

**关键词:**磷收支;磷足迹;环境风险;苹果主产区

中图分类号:S153.6 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2019)12-2779-09 doi:10.11654/jaes.2019-1078

### Phosphorus budgets and their associated environmental risks in the main apple orchard areas in China from 2006 to 2016

ZHAO Yang, LI Zhuo, LIU Ming, XIAO Xiao, WANG Chong-yang, SUN Dan-feng, LUN Fei\*

(School of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193)

**Abstract:** Intensive apple production can bring economic benefits but may also create environmental problems. Phosphorus is vital for plants and thus, applying P to croplands can enhance production; however, it can also result in environmental risks. Therefore, it is highly important to estimate the phosphorus budget and its associated environmental risks in the main apple orchard areas in China, as this would be beneficial to ecological conservation and rural revitalization. Thus, we estimated the phosphorus budget and its associated environmental risks in the main apple orchard areas in China during 2006—2016 based on material flow analysis, P footprints, grey water footprint, and other factors. The main results were as follows. In 2006—2016, P inputs per unit area of China's main apple producing areas showed a trend of "first increase and then decrease," while the P content of the produced apples showed a slight increase, which led to the same trend of "first increase and then decrease" for the P footprints of China's main apple producing areas. During the same period, the total P inputs in these areas reached  $1.8486 \times 10^6$  t, whereas the total phosphorus utilization efficiency was only 3.95%. The risk to the water environment from apple cultivation in the main apple producing areas showed an increasingly serious trend during 2006—2010 but it improved in the following years, while the soil environmental risks always showed an increasingly serious trend. There are certain differences in P inputs per unit area, P footprints, and environmental risks in different regions in China. Therefore, this study can provide a scientific basis for improving regional rural revitalization and constructing an ecological civilization.

**Keywords:** phosphorus budget; phosphorus footprint; environmental risk; apple main producing area

收稿日期:2019-09-12 录用日期:2019-11-01

作者简介:赵 旸(1996—),女,云南临沧人,硕士研究生,从事土地生态学 research。E-mail:zhaoy906526@cau.edu.cn

\*通信作者:伦 飞 E-mail:lunfei@cau.edu.cn

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0201207);国家自然科学基金项目(41801202,41911530693)

**Project supported:** The National Key R&D Program of China (2016YFD0201207); The National Natural Science Foundation of China (41801202, 41911530693)

磷元素是植物生长所必需的营养元素,磷元素的缺乏会对作物的产量产生影响。因此,磷肥施用的增加在一定程度上有利于作物产量的提高<sup>[1-2]</sup>,这使得农业生产对磷元素的需求不断增加。与此同时,磷元素的大量施用,已经超过了全球可持续发展的“行星边界”,使得磷元素的开采利用处于高风险状态<sup>[3]</sup>。作为不可再生资源的磷矿,以目前的开采速度,全球磷矿将在未来40~400年内枯竭<sup>[4]</sup>。目前研究表明,中国农田磷肥使用量不断增加,且已经远超农作物磷吸收量,使得中国农田磷使用效率明显下降,由20世纪60年代的0.6左右下降到2011年的0.3左右<sup>[5-6]</sup>。与此同时,中国农业系统高投入、低效率的粗放式管理方式,也带来了一些生态环境问题,如土壤磷积累和水体富营养化等<sup>[7-8]</sup>,这已经影响到了我国生态文明建设和乡村振兴建设的目标。因此,研究农业系统的磷循环及其环境风险具有重要的理论价值与现实意义。

随着经济水平的提高,人们对水果的消费量不断增加,根据世界粮农组织数据统计,2000年至2016年,全球水果产量从4.79亿t增长至7.23亿t,尤其是苹果的生产量不断增加,由2000年的5913万t增长至2016年的8868万t,这表明全球苹果的种植面积和物质投入不断增大<sup>[9]</sup>。中国作为世界上苹果种植面积最大的国家,在2017年,其种植面积达到了194.69万 $\text{hm}^2$ ,产量达到了4139万t;与此同时,我国苹果种植的物质投入也不断增加,以磷元素施用量为例,其单位面积施用量已经由2008年的 $181.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增加到2013年的 $238.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,并呈逐年增加趋势,而远高于全球平均水平<sup>[10-12]</sup>。苹果园粗放式的磷元素管理方式,不仅加剧了我国磷矿资源的耗竭,还给我苹果种植区带来了严重的生态环境问题,威胁到当地的生态安全<sup>[13-15]</sup>;此外,过量的磷肥施用还会对苹果的品质产生一定的影响,进而对其销售产生影响<sup>[16]</sup>。因此,如何在保障苹果产量和品质的前提下,更好地实现区域环境可持续发展,已经成为中国苹果主产区所面临的关键问题,受到了社会各界的广泛关注。

国内外学者对农业系统的磷元素利用及其环境风险状况开展了大量的研究,并取得了很好的研究成果。目前的研究主要是基于物质流分析的方法,研究了不同尺度下农业利用系统磷元素循环<sup>[17-18]</sup>、施用效率<sup>[5]</sup>、利用强度<sup>[19-20]</sup>等问题。针对以苹果为代表的经济作物磷元素循环及其环境风险的研究,主要采用种植实验分析和养分盈余分析等方法,研究某一特定地区果园的土壤磷素环境敏感临界值<sup>[21]</sup>、磷投入特

征<sup>[22]</sup>、磷素盈余状况<sup>[23-24]</sup>,缺少分析不同区域的苹果种植磷循环过程及其环境风险状况。因此,对比分析我国苹果主产区磷元素循环过程,探讨其风险状况及其变化规律,对于更好地实现我国区域可持续发展和生态文明建设具有重要的现实意义和价值。

由于我国地域面积大,地区之间的差异明显,苹果生产主要集中在陕西、山东、河南、山西、河北、辽宁、甘肃、宁夏等地区,其2016年的苹果种植面积占全国总种植面积的88%左右,而产量则占全国总产量的90%以上。因此,对比研究我国苹果主产区的磷元素收支及其环境风险变化状况,对于更好地实现当地乡村振兴和区域生态文明建设,具有重要的意义。因此,本文基于物质流分析的方法,研究了2006—2016年中国苹果主产区的磷元素收支状况,并以磷足迹为基础,探究了不同区域苹果种植的环境风险及其变化规律,以期为更好地实现区域生态文明建设和乡村振兴提供政策建议。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究方法

#### 1.1.1 苹果园磷收支研究

基于物质流分析方法,苹果园磷元素收支主要是由磷元素的投入量和输出量决定的,其中苹果园磷元素投入( $P_{\text{input}}$ )包括化肥( $P_{\text{CF}}$ )和农家肥( $P_{\text{man}}$ )的投入,而苹果园磷输出主要包括经济产品输出( $P_{\text{out-eco}}$ )、地表径流( $P_{\text{runoff}}$ )和地下渗漏( $P_{\text{leach}}$ ),其中苹果园经济产品磷输出主要是指所生产苹果中的磷元素含量。具体计算方法如下:

化肥的磷投入量( $P_{\text{CF}}$ )是根据化肥消费量( $CF_i$ )与其含磷量( $P_{\text{CF-i}}$ )相乘得到的。由于农家肥的施用量难以直接获取,本文假定来自农家肥和化肥的单位磷元素的费用一致,故可以通过施用化肥的费用( $C_{\text{CF}}$ )、施用农家肥的费用( $C_{\text{man}}$ )及化肥的磷投入( $P_{\text{CF}}$ )得到农家肥施用量( $P_{\text{man}}$ ),因此,苹果园磷元素的收入量计算公式如下:

$$P_{\text{input}} = P_{\text{CF}} + P_{\text{man}} = P_{\text{CF}} + P_{\text{CF}} \times \frac{C_{\text{man}}}{C_{\text{CF}}} = CF_i \times P_{\text{CF-i}} + CF_i \times P_{\text{CF-i}} \times \frac{C_{\text{man}}}{C_{\text{CF}}} \quad (1)$$

苹果园的经济产品磷输出( $P_{\text{out-eco}}$ )主要是根据苹果园产量( $PD_{\text{eco}}$ )及其单位苹果的含磷量( $PC_{\text{eco}} = 0.02 \text{ kg} \cdot 100 \text{ kg}^{-1}$ )得到的;根据付永虎等<sup>[25]</sup>的研究结果,苹果园磷肥地表径流( $P_{\text{runoff}}$ )和地下渗漏( $P_{\text{leach}}$ )的磷输出

量主要是根据磷元素径流流失系数( $\alpha_{\text{apple}}$ )和磷肥淋溶流失系数( $\beta_{\text{apple}}$ )得到的,其值分别为0.514和0.278,具体如下:

$$P_{\text{out-eco}} = PD_{\text{eco}} \times P_{\text{eco}} \quad (2)$$

$$P_{\text{runoff}} = P_{\text{input}} \times \alpha_{\text{apple}} \quad (3)$$

$$P_{\text{leach}} = P_{\text{input}} \times \beta_{\text{apple}} \quad (4)$$

### 1.1.2 磷足迹

足迹分析可以探究作物产出与环境风险之间的联系,如用于衡量自然资源可持续利用的水足迹、碳足迹、氮足迹等<sup>[26-27]</sup>。磷元素作为一种有限的自然资源,利用足迹分析的方法,可用来研究农作物在不同生产过程中磷循环的资源环境效应问题。目前,对于磷足迹的研究,国内外学者基于不同角度提出了不同的磷足迹概念和计算方法,例如Meston等<sup>[28]</sup>将人均磷足迹定义为“满足每年的人均食物消耗量所需磷矿石量”,许肃等<sup>[19]</sup>将磷足迹定义为“在生产某种产品整个供应链的所有磷元素投入之和”,而张丹等将磷足迹定义为“1 kg食物所需投入的所有磷元素总量”<sup>[20]</sup>。因此,本文借鉴前人对磷足迹的相关研究,从资源投入和产品产出的角度出发,将磷足迹(*Phosphorus Footprint*)定义为:每生产含1 kg磷元素的农作物所需要投入磷元素的总量,故其可以揭示农作物生产的磷元素利用效率等问题。因此,苹果园磷足迹的计算公式如下:

$$PF = \frac{P_{\text{input}}}{P_{\text{out-eco}}} = \frac{CF_i \times P_{CF-i} + CF_i \times P_{CF-i} \times \frac{C_{\text{man}}}{C_{CF}}}{PD_{\text{eco}} \times PC_{\text{eco}}} \quad (5)$$

### 1.1.3 苹果主产区总磷投入量

苹果主产区的总磷投入量是由苹果园的经济产品磷输出( $P_{\text{out-eco}}$ )及其磷足迹( $PF$ )得到的。因此,根据苹果主产区2006—2016年的苹果总产量( $PT_{\text{crop}}$ ),便可以得到苹果主产区的经济产品磷输出,进而可以得到总磷投入量,具体的计算公式如下:

$$P_{\text{total}} = PF \times PT_{\text{crop}} \times PC_{\text{eco}} \quad (6)$$

式中: $P_{\text{total}}$ 为苹果主产区每年的总磷投入量; $PT_{\text{crop}}$ 为苹果主产区每年的总产量。

### 1.1.4 苹果园磷投入环境风险评价

根据前人的研究结果,苹果园磷投入的环境风险主要包括水体环境风险和土壤环境风险<sup>[25,29]</sup>,其中:水体环境风险主要是指农业生产活动中,磷元素通过地表径流和地下渗漏进入水体中所造成的环境污染<sup>[25]</sup>,目前对于农业生产磷投入的水体环境风险主要是通过灰水足迹的方式进行表征;磷投入的土壤环境

风险,主要是由于磷元素大量投入之后,使得过量的磷元素积累于农地土壤之中,进而对土壤理化性质产生影响,目前,土壤环境风险的评价主要是与土壤磷环境安全阈值比较,确定农业系统磷投入的土壤环境风险状态<sup>[29]</sup>。因此,苹果主产区磷投入的环境风险评价方法具体如下:

#### (1) 水体环境风险

付永虎等<sup>[25]</sup>采用氮足迹和灰水足迹理论,对农业土地利用系统投入减量化趋势与环境风险降低潜能进行综合评估,为农业土地利用环境效率评价提供了全新的量化指标。因此,本文基于灰水足迹的方法,利用苹果园磷收支状况,估算了中国苹果主产区磷投入所造成的水体环境风险状况,具体计算公式如下:

$$GWF_{\text{TP}} = \frac{(P_{\text{runoff}} + P_{\text{leach}})}{(C_{\text{TPmax}} - C_{\text{TPnat}})} \quad (7)$$

$$P_{\text{runoff}} = F_{\text{PK}} \times \alpha_{\text{apple}} \quad (8)$$

$$P_{\text{leach}} = F_{\text{PK}} \times \beta_{\text{apple}} \quad (9)$$

式中: $GWF_{\text{TP}}$ 为磷肥灰水足迹; $P_{\text{runoff}}$ 为总磷流失总量; $P_{\text{leach}}$ 为总磷淋溶损失总量; $C_{\text{TPmax}}$ 为水体中允许总磷的最大浓度,取值 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (Ⅲ类); $C_{\text{TPnat}}$ 为水体中的本底浓度,取值 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $F_{\text{PK}}$ 为苹果园的施磷量; $\alpha_{\text{apple}}$ 为苹果园磷肥径流流失系数,取值0.514; $\beta_{\text{apple}}$ 为苹果园磷肥淋溶流失系数,取值0.278。

#### (2) 土壤环境风险

刘钦普利用环境风险指数模型得出磷元素的环境安全阈值为 $62.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,并按照施用量超过环境安全阈值的倍数,把磷元素施用所造成的土壤环境风险分成了6个不同的等级,如表1所示。本文根据刘钦普<sup>[29]</sup>的环境风险指数模型,对苹果园的土壤环境风险进行了评价,具体计算公式如下:

$$R_p = \frac{F_p}{F_p + T_p} \quad (10)$$

$$F_p = \frac{M_p}{A} \quad (11)$$

式中: $R_p$ 为磷肥污染环境风险指数; $T_p$ 为磷肥环境安全阈值,取值为 $62.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ;  $F_p$ 为磷肥施用强度,是指本年内单位面积耕地实际用于农业生产的磷肥施用量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ;  $M_p$ 表示当年磷肥施用量, $\text{kg}$ ;  $A$ 表示耕地面积, $\text{hm}^2$ 。

## 1.2 数据来源

本研究需要的数据包括2006—2016年中国苹果主产区的播种面积,年产量,单产,化肥施用量,化肥、农家肥价格,苹果含磷量,苹果园磷肥径流流失系数,苹果园磷肥淋溶流失系数,水体中允许总磷的最大浓

表1 磷肥使用环境风险指数( $R_i$ )  
Table 1 Environmental risk index ( $R_i$ ) for P application

等级 Grade	环境风险指数范围 Environmental risk index range	环境风险类型 Environmental risk type	分类依据 Classification basis
5	>0.80	严重风险	施肥量超过安全阈值4倍以上
4	0.76~0.80	重度风险	施肥量不超过安全阈值4倍
3	0.66~0.75	中度风险	施肥量不超过安全阈值3倍
2	0.51~0.65	低度风险	施肥量不超过安全阈值2倍
1	0.36~0.50	尚安全	施肥量不超过安全阈值
0	<0.35	安全	施肥量低于安全阈值一半

度,磷肥环境安全阈值等,主要来源为《全国农产品成本收益资料汇编》(2006—2016)、农村统计年鉴及相关文献<sup>[25,29]</sup>。

## 2 结果和分析

### 2.1 中国苹果主产区磷收支

在2006—2016年,中国苹果主产区单位面积磷投入呈先增加后减少的变化趋势(图1),且在2010年时达到了最大值( $185.90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ),其为2006年单位面积磷投入量的1.69倍。随着生态文明建设的不断推进,中国开始实行农业双减政策,苹果主产区的磷投入量逐渐减少,到2016年时,单位面积磷投入量降低至 $142.51 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。此外,受国际磷肥价格上涨的影响,2008年中国苹果主产区磷元素的投入量相对较低。由此可见,中国苹果主产区磷元素的投入量受农业发展水平、国家政策、市场经济等方面的综合影响。

在2006—2016年间,中国苹果主产区单位面积产量呈略微波动增加的趋势,其含磷量由2006年的 $5.84 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增加到2015年的 $6.61 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,平均为 $6.16 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。尽管单位面积磷投入量在2008年相对较少,但其产量并未受明显的影响,这表明中国苹果主产区土壤磷积累量相对较高,在磷投入量相对减少时仍能保持相对较高的产量。因此,通过充分合理利用土壤中的营养元素,不仅能够保证苹果产量,还能够实现农业化肥减施的目标。

2016年中国不同苹果主产区单位面积磷收支存在较大的差异(表2),其中:山东的单位面积苹果园磷投入量最高,达到了 $248.62 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,为甘肃的3倍左右;山东苹果园高投入的管理方式,使得单位面积苹果产量相对较高,其含磷量达到了 $8.11 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,是全国苹果主产区平均值的1.31倍。然而,与其他省份相比,山东磷元素的利用效率最小(仅为3.26%),不到宁夏苹果园磷利用效率的一半。此外,辽宁和河南单位面积磷投入量也相对较高,但他们的磷元素利用

效率也相对较低,均低于4%,这表明山东、辽宁和河南苹果种植面临着较高的磷环境风险,需要引起进一步的关注。

### 2.2 中国苹果主产区磷足迹

磷足迹可以用于表征苹果种植过程中磷元素投入与产出情况(表3)。在2006—2016年,中国苹果主产区的磷足迹为 $25.19 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,即每生产含1 kg磷的苹果需要投入的磷元素总量为25.19 kg。与单位面积磷投入量类似,我国苹果主产区的磷足迹也呈现出先增加后减少的变化趋势,且在2010年时达到了最大值( $32.48 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )。2008年磷投入量相对较少,但其产量并未受到影响,因此2008年磷足迹最低,为 $17.01 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,但也远高于世界平均水平。此外,中国苹果主产区的磷足迹在2009—2014年时相对较高,

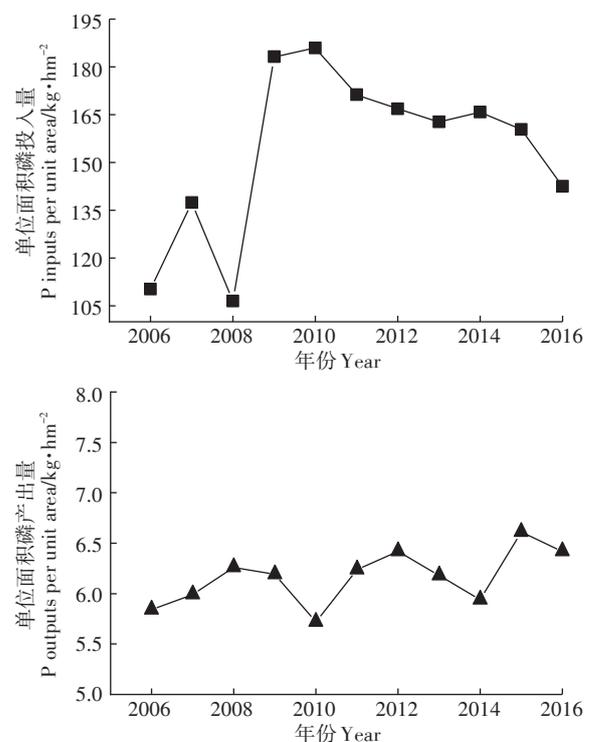


图1 中国苹果主产区2006—2016年单位面积磷收支情况  
Figure 1 P inputs and outputs per unit area in different provinces during the period of 2006—2016

均高于  $25 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 但2015年和2016年呈现出明显的下降趋势, 这表明我国农业双减政策效果开始呈现。因此, 合理的农业生产方式, 能够维持相对较高的农作物产量, 还有利于节约自然资源。

在2016年, 中国不同苹果主产区的磷足迹存在一定的差异(表4)。辽宁、山东和河南的磷足迹相对较高, 均高于2016年的平均水平( $24.13 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), 其中: 辽宁苹果种植的磷足迹最高, 其值为  $31.31 \text{ kg} \cdot$

$\text{kg}^{-1}$ , 其次为山东, 其苹果种植的磷足迹为  $30.78 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 表明这两个地区面临着相对较大的环境风险。甘肃苹果种植的磷足迹最低, 为  $13.88 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 这主要是由于其苹果园产量相对较高, 而其投入量相对较少, 使得磷元素利用率相对较高。

### 2.3 中国苹果主产区总磷投入量

在2006—2016年, 中国苹果主产区总产量达  $366.94 \text{ Mt}$ , 总磷含量为  $7.34 \text{ 万 t}$ (表5)。因此, 根据不

表2 2016年中国苹果主产区单位面积磷收支情况

Table 2 P inputs and outputs per unit area in different provinces in 2016

地区 Area	单位面积磷投入 P inputs per unit area/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	单位面积含磷量 P outputs per unit area/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	单位面积磷施用效率 Phosphorus use efficiency per unit area/%
河北	125.48	5.31	4.23
山西	117.75	6.26	5.32
辽宁	158.43	5.16	3.26
山东	248.62	8.11	3.26
河南	173.88	6.93	3.98
陕西	122.89	5.54	4.51
甘肃	82.71	5.82	7.04
宁夏	82.82	6.24	7.54

表3 中国2006—2016年苹果磷足迹变化情况

Table 3 P footprints of apple orchards in China during the period of 2006—2016

年份 Year	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	平均值
磷足迹 P footprint/ $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$	18.86	22.95	17.01	29.60	32.48	27.44	26.01	26.35	27.89	24.45	22.19	25.19

表4 2016年中国不同苹果主产区磷足迹对比

Table 4 Comparison of P footprints for different provinces in China in 2016

地区 Area	河北	山西	辽宁	山东	河南	陕西	甘肃	宁夏	平均值
磷足迹 P footprint/ $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$	23.96	18.93	31.31	30.78	24.98	22.26	13.88	17.59	24.13

表5 中国苹果主产区磷投入情况

Table 5 P input in China's main apple producing areas

年份 Year	磷足迹 Phosphorus footprint/ $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$	总产量 Total output/Mt	总含磷量 Total phosphorus production/ $10^4 \text{ t}$	总磷投入 Total phosphorus input/ $10^3 \text{ t}$
2006	18.86	26.06	0.52	98.28
2007	22.95	27.35	0.55	125.55
2008	17.01	28.99	0.58	98.62
2009	29.60	30.47	0.61	180.40
2010	32.48	31.65	0.63	205.61
2011	27.44	33.67	0.67	184.77
2012	26.01	35.81	0.72	186.28
2013	26.35	36.3	0.73	191.29
2014	27.89	37.35	0.75	208.36
2015	24.45	38.9	0.78	190.21
2016	22.19	40.39	0.81	179.26
总计	—	366.94	7.34	1 848.62

同省份苹果生产的产量及其磷足迹,便可以得到其苹果种植的磷元素投入情况。在2006—2016年间,中国苹果主产区苹果种植投入的总磷量达到了184.86万t(即11年苹果种植的年均磷投入量达16.81万t),总磷含量为7.34万t,故其磷元素利用效率仅为3.95%。在这时期内,中国苹果主产区的苹果产量、磷投入量和含磷量均呈增加的趋势,其中:苹果总产量增加了55%,由2006年的26.06 Mt增加到2016年的40.39 Mt,而其含磷量由2006年的0.52万t增加到2016年的0.81万t;苹果生产的磷投入总量在2014年达到最高,为20.84万t,随着中国政府采取“双减”政

策和开展“2020年化肥零增长”项目,苹果种植的总磷投入量在2015年和2016年有所减少。在2016年,中国苹果主产区的总磷投入量达到了17.93万t,其中山东的总磷投入量最多,投入了5.07万t,占主产区总磷投入量的28.31%;其次是陕西,占主产区总投入量的27.57%。此外,山西、河南苹果种植的总磷投入也超过了主产区总磷投入量的15%。

中国苹果主产区2006—2016年果园种植磷元素总投入量呈现出不同规律(图2),这与果园种植面积、单位面积产量和磷足迹均有密切关系,其中:山东省的总磷投入变化趋势为先增加后减少,主要是苹

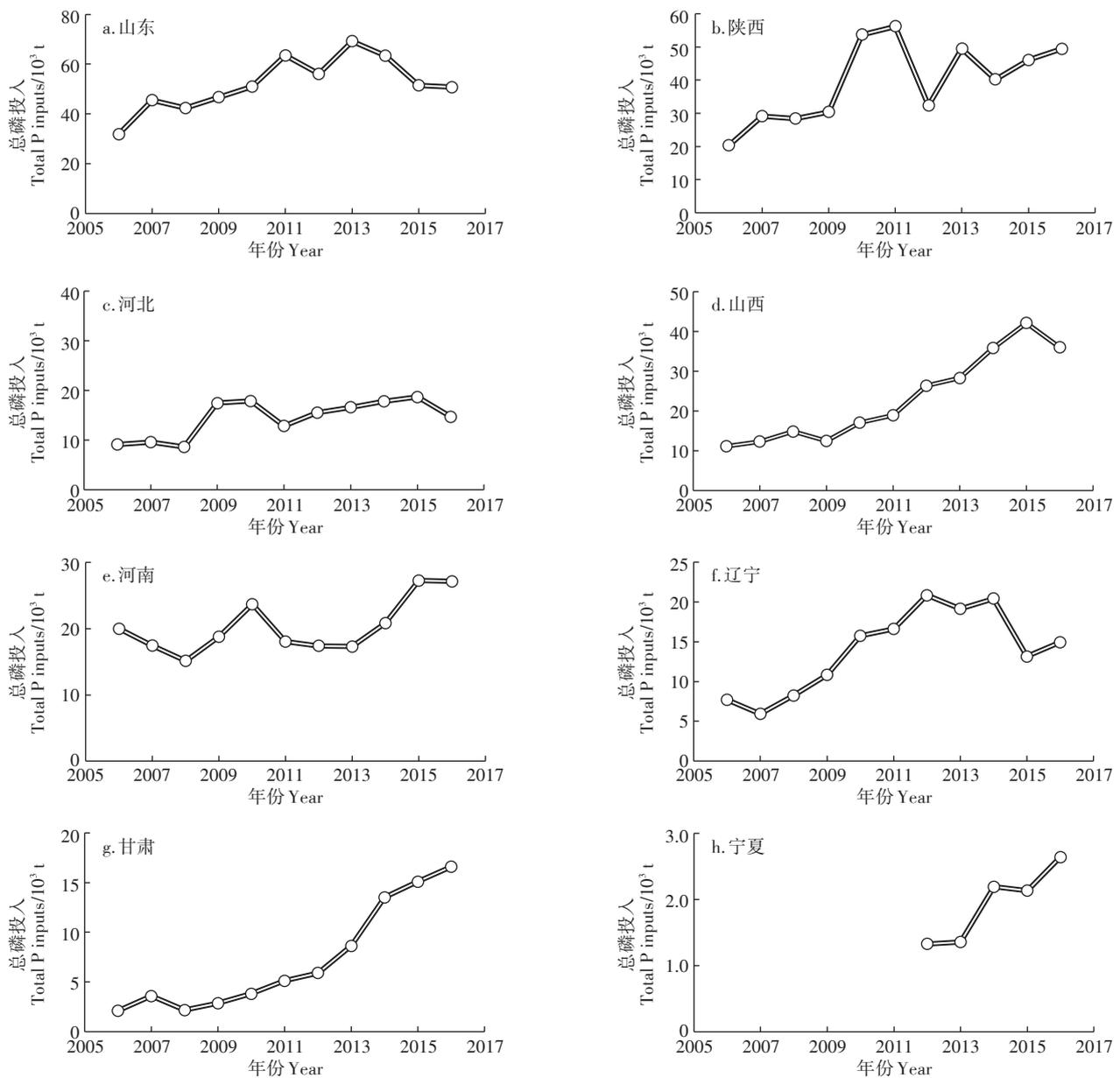


图2 2006—2016年中国苹果主产区总磷投入变化情况

Figure 2 Total P inputs for main apple producers in China during the period of 2006—2016

果磷足迹和单位面积产量在2012年后有所下降,带动了山东苹果种植总磷投入量的下降;陕西、河北和河南苹果种植总磷投入呈波动上升,是因为陕西扩大了种植面积,磷足迹波动较小;河北和河南虽然单位面积产量和播种面积变化较小,但磷足迹小幅度增加带动了总磷投入的增加;辽宁、甘肃、宁夏等地区苹果种植受磷足迹逐年增加的影响较大,总磷投入呈增加趋势。

## 2.4 中国苹果主产区环境风险变化

### 2.4.1 水环境风险

本文对于苹果主产区的水环境风险研究采用了灰水足迹法,其是用稀释污染物所需要的水量对环境风险进行评价,其数值越大表明风险相对越高。中国苹果主产区的水环境风险呈现出先迅速增加,再波动缓慢增加,近期出现逐渐改善的趋势。如表6所示,2006—2010年(除2008年受国际磷肥价格的影响外),果园面积的迅速增加和单位面积磷投入量的不断增加,使得中国苹果主产区的水环境风险日趋严重。中国苹果主产区2010年的总灰水足迹达到了 $8.1 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ,是2006年的2.08倍,此外单位面积灰水足迹由2006年的 $2.05 \times 10^5 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 增加到2010年的 $4.22 \times 10^5 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ;在2011—2014年间,尽管单位面积磷投入量略有减少,但果园面积呈不断增加趋势,这使得中国苹果主产区的水环境风险呈波动增加的趋势,到2014年时,中国苹果主产区的总灰水足迹达到了 $8.3 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ,在这段时间,单位面积灰水足迹为 $4.18 \times 10^5 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ;中国苹果主产区在2015年和2016年的单位面积灰水足迹不断下降,且苹果种植面积也相对稳定,使得总灰水足迹分别为 $7.5 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 和 $7.1 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ,与2014年相比,苹果种植的水环境风险得到了一定的控制。

由图3可见,在2016年,磷肥灰水足迹年均最大值的苹果主产区为山东( $2.1 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ),其次为陕西( $1.6 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ),两个高产区的苹果种植面积大,磷投入量高,使得磷肥灰水足迹较大。甘肃苹果园的磷足迹较小,磷肥灰水足迹最小,仅为 $3 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 。苹果主产区磷肥灰水足迹的大小与苹果种植面积、磷足迹大小

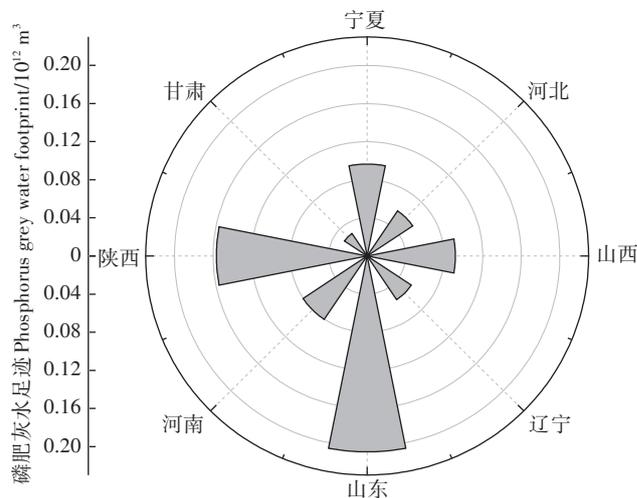


图3 中国苹果主产区2016磷投入灰水足迹对比

Figure 3 The total P grey water footprints in the main apple orchard areas in China in 2016

有一定的关系,种植面积较大、磷足迹较大的产区,磷的投入量较大,果园的水环境风险程度也相对较高。

### 2.4.2 土壤环境风险

根据刘钦普的估算方法,本文对比分析了中国苹果主产区磷投入的土壤环境风险情况(图4)。与2006年相比,中国各个苹果主产区的磷投入土壤环境风险分析均呈加剧趋势,在2016年,除宁夏处于低度风险外,其他苹果主产区均处于中度风险或重度风险情况。具体而言:山东苹果园磷投入环境风险程度由低度风险转为严重风险后降为重度风险;河南和辽宁苹果园磷投入环境,除少数几年处于重度风险外,基本都处于中度风险;河北和山西苹果种植土壤环境由低风险变为中风险;甘肃苹果磷投入土壤环境风险由安全转向低度风险再转向中度风险;宁夏则由安全转为低风险。由此可见,我国苹果种植土壤环境风险仍处于风险不断增加趋势,需要得到进一步的控制,从而更好地实现区域乡村振兴和生态文明建设。

## 3 结论与建议

### 3.1 结论

(1)在2006—2016年,中国苹果主产区单位面积磷投入呈先增加后减少的趋势,而生产苹果的含磷量

表6 2006—2016年苹果园磷肥灰水足迹

Table 6 The P grey water footprints for the main apple orchard areas in China during the period of 2006—2016

年份 Year	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
磷肥灰水足迹 Total P grey water footprint/ $10^{11} \text{ m}^3$	3.9	5.0	3.9	7.1	8.1	7.3	7.4	7.6	8.3	7.5	7.1
单位土地利用面积的灰水足迹 P grey water footprint per unit area/ $10^5 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$	2.05	2.65	2.11	3.80	4.22	3.76	3.73	3.85	4.18	3.77	3.65

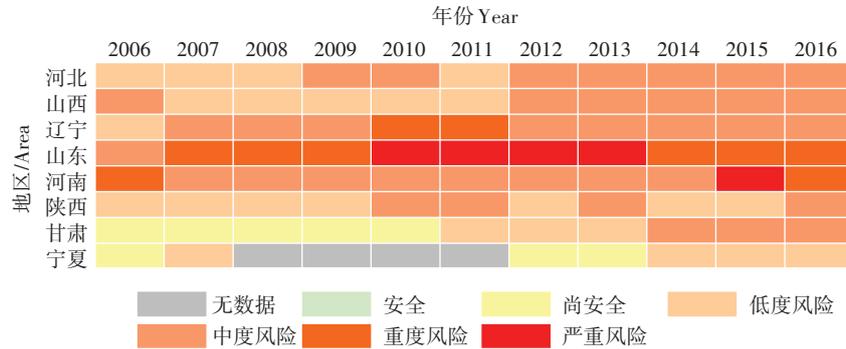


图4 中国苹果主产区2006—2016磷投入的土壤环境风险变化情况

Figure 4 The soil environmental risks due to P inputs for the main apple orchard areas in China during the period of 2006—2016

则呈现略微波动增加的趋势,这使得中国苹果主产区磷足迹也呈现出先增加后减少的变化趋势,且在2010年时达到了最大值。此外,中国的农业环境政策在一定程度上有利于提高苹果种植的磷元素利用效率,实现资源可持续利用。

(2)中国不同的苹果主产区单位面积磷投入和磷足迹呈现出一定的差异,其中:山东、辽宁、河南单位面积磷投入量较高,且磷足迹相对较高,使得磷元素利用效率相对较低,它们面临着相对较高的磷环境风险,需要引起进一步的关注。

(3)苹果种植对中国苹果主产区造成了一定的环境风险,其中:水环境风险在2006—2010年时呈不断严重的趋势,但随后几年则有所改善,而土壤环境风险则均呈不断严重的趋势。此外,不同区域的环境风险有所差异,其中山东和陕西的水环境风险相对严重,而山东和河南的土壤环境风险则相对严重。

### 3.2 建议

(1)确定合理的化肥投入,保障资源利用效率、作物产量和生态环境风险之间的耦合关系,实现区域经济发展、乡村振兴和生态环境保护三重目标。

(2)加强政府引导机制,保障苹果种植肥料合理施用。

(3)加强果农的管理教育,提高他们的科学种植和环境保护意识。

### 参考文献:

[1] 贺琦琦,郭向红,杨凯,等.滴灌施磷钾肥对矮砧苹果树生理生长和产量的影响[J].节水灌溉,2019(8):24-27.  
HE Qi-qi, GUO Xiang-hong, YANG Kai, et al. Effects of phosphorus and potassium fertilizer on physiological growth and yield of dwarf rootstock apple trees under drip irrigation[J]. *Water Saving Irrigation*, 2019 (8):24-27.

[2] 张阳,黄炳林,张明聪,等.氮磷调控对大豆-玉米轮作周年产量和养分利用效率的影响[J].大豆科学,2019(5):762-769.  
ZHANG Yang, HUANG Bing-lin, ZHANG Ming-cong, et al. Effect of nitrogen and phosphorus regulation on crop yield and nutrient efficiency under soybean and maize rotation[J]. *Soybean Science*, 2019 (5): 762-769.

[3] Steffen W, Richardson K, Rockström J, et al. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet[J]. *Science*, 2015, 347(6223):1259855

[4] 孙小虹,陈春琳,王高尚,等.中国磷矿资源需求预测[J].地球学报,2015(2):213-219.  
SUN Xiao-hong, CHEN Chun-lin, WANG Gao-shang, et al. The prediction of phosphate rock demand in China[J]. *Chinese Journal of Earth*, 2015(2):213-219.

[5] 伦飞,刘俊国,张丹.1961—2011年中国农田磷收支及磷使用效率研究[J].资源科学,2016,38(9):1681-1691.  
LUN Fei, LIU Jun-guo, ZHANG Dan. Trends in cropland P balance and P use efficiency in China from 1961 to 2011[J]. *Resources Science*, 2016, 38(9):1681-1691.

[6] Yuan Z. Intensification of phosphorus cycling in China since the 1600s [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, 113(10): 2609.

[7] Xiao H F, Tian Y H, Zhou H P, et al. Intensive rubber cultivation degrades soil nematode communities in Xishuangbanna, southwest China [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 76:161-169.

[8] Chen Z J, Wang L, Wei A S, et al. Land-use change from arable lands to orchards reduced soil erosion and increased nutrient loss in a small catchment[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 648:1097-1104.

[9] 王利民,刘佳,高建孟.中国苹果空间分布格局及年际动态变化分析[J].中国农业信息,2019(4):84-93.  
WANG Li-min, LIU Jia, GAO Jian-meng. Analysis of spatial pattern and interannual dynamics of apple planting area in China[J]. *China Agricultural Information*, 2019(4):84-93.

[10] 朱占玲,夏营,刘晶晶,等.山东省苹果园磷素投入调查及磷环境负荷风险分析[J].园艺学报,2017,44(1):97-105.  
ZHU Zhan-ling, XIA Ying, LIU Jing-jing, et al. Analysis of soil phosphorus input and phosphorus environment load risk in major apple

- production regions of Shandong Province[J]. *Journal of Horticulture*, 2017, 44(1):97-105.
- [11] 陈敏鹏,郭宝玲,刘 昱,等.磷元素物质流分析研究进展[J].生态学报,2015,35(20):6891-6900.  
CHEN Min-peng, GUO Bao-ling, LIU Yu, et al. Research on phosphorus flow analysis: Progress and perspectives[J]. *Journal of Ecology*, 2015, 35(20):6891-6900.
- [12] Sattari S Z, van Ittersum M K, Giller K E, et al. Key role of China and its agriculture in global sustainable phosphorus management[J]. *Environmental Research Letters*, 2014, 9(5):054003.
- [13] Demestihis C, Plenet D, Genard M, et al. A simulation study of synergies and tradeoffs between multiple ecosystem services in apple orchards[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 236:1-16.
- [14] 张慧敏,徐秋桐,章明奎.水土保持措施降低河网平原区果园地表氮磷铜流失[J].农业工程学报,2014,30(2):132-138.  
ZHANG Hui-min, XU Qiu-tong, ZHANG Ming-kui. Application of different management measures to reduce runoff losses of nitrogen, phosphorus and copper from orchard in dense river network plain[J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2014, 30(2):132-138.
- [15] Lun F, Liu J, Ciais P, et al. Global and regional phosphorus budgets in agricultural systems and their implications for phosphorus-use efficiency[J]. *Earth Syst Sci*, 2018, 10:1-18.
- [16] 王春枝,朱福磊,刘丽杰,等.氮磷钾肥对红富士苹果产量、品质和叶片矿质元素含量的影响[J].中国果树,2009(2):14-17.  
WANG Chun-zhi, ZHU Fu-lei, LIU Li-jie, et al. Effects of N, P and K fertilizers on yield, quality and mineral element content of red Fuji apple[J]. *Chinese Fruit Tree*, 2009(2):14-17.
- [17] 王晓燕,阎恩松,欧 洋.基于物质流分析的密云水库上游流域磷循环特征[J].环境科学学报,2009,29(7):1549-1560.  
WANG Xiao-yan, YAN En-song, OU Yang. Material flow analysis of the phosphorus cycle in the upper watershed of the Miyun Reservoir in Beijing[J]. *Journal of Environmental Science*, 2009, 29(7):1549-1560.
- [18] 刘 毅,陈吉宁.中国磷循环系统的物质流分析[J].中国环境科学,2006(2):238-242.  
LIU Yi, CHEN Ji-ning. Substance flow analysis of phosphorus cycle system in China[J]. *China Environmental Science*, 2006(2):238-242.
- [19] 许 肃,黄云凤,高 兵,等.城市食物磷足迹研究——以龙岩市为例[J].生态学报,2016,36(22):7279-7287.  
XU Su, HUANG Yun-feng, GAO Bing, et al. Study on phosphorus footprint of urban food: A case study in Longyan City[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 36(22):7279-7287.
- [20] 张 丹,伦 飞,成升魁,等.城市餐饮食物浪费的磷足迹及其环境排放——以北京市为例[J].自然资源学报,2016,31(5):812-821.  
ZHANG Dan, LUN Fei, CHENG Sheng-kui, et al. The phosphorus footprint and its environmental analysis for restaurant food waste: taking Beijing as an example[J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(5):812-821.
- [21] 李发林,曾瑞琴,危天进,等.福建省平和县琯溪蜜柚果园土壤磷环境风险评价研究[J].中国生态农业学报,2015,23(8):1001-1009.  
LI Fa-lin, ZENG Rui-qin, WEI Tian-jin, et al. Risk assessment in soil phosphorus environment of Guanxi pummelo orchard in Pinghe County, Fujian Province[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(8):1001-1009.
- [22] 张世祺.蜜柚集中连片种植区的氮、磷环境风险及其阻控措施研究[D].福州:福建农林大学,2019.  
ZHANG Shi-qi. Study on the environmental risks of nitrogen and phosphorus in the concentrated contiguous planting area of honey pomelo and its control measures[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2019.
- [23] 卢树昌,陈 清,张福锁,等.河北果园主分布区土壤磷素投入特点及磷负荷风险分析[J].中国农业科学,2008(10):3149-3157.  
LU Shu-chang, CHEN Qing, ZHANG Fu-suo, et al. Characteristics of soil phosphorus input and phosphorus load risk in major orchards region of Hebei[J]. *Chinese Agricultural Science*, 2008(10):3149-3157.
- [24] 李 玲,段英华,徐明岗,等.河北省不同利用方式农田土壤氮磷环境风险分析[J].中国农业资源与划,2016,37(7):96-100,149.  
LI Ling, DUAN Ying-hua, XU Ming-gang, et al. Environmental risk analysis of soil nitrogen and phosphorus of Hebei Province with different land use[J]. *China Agricultural Resources and Regional Planning*, 2016, 37(7):96-100,149.
- [25] 付永虎,刘黎明,王加升,等.高集约化农区投入减量与环境风险降低潜势的时空分异特征[J].农业工程学报,2017,33(2):266-275.  
FU Yong-hu, LIU Li-ming, WANG Jia-sheng, et al. Spatial-temporal variations of dematerialization of inputs and environmental risk reduction in intensive agricultural region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(2):266-275.
- [26] Riss W E, Wackernagel M. Ecological footprints and appropriated carrying capacity measuring the natural capital requirements of the human economy[J]. *Focus*, 1996, 2(6):121-130.
- [27] Mathis W, William E R. Perceptual and structural barriers to investing in natural capital economics from an ecological footprint perspective[J]. *Ecological Economics*, 1997, 1(20):3-24.
- [28] Metson G S, Bennett E M, Elser J J. The role of diet in phosphorus demand[J]. *Environmental Research Letters*, 2012, 4(7):44043.
- [29] 刘钦普.中国化肥投入区域差异及环境风险分析[J].中国农业科学,2014,47(18):3596-3605.  
LIU Qin-pu. Distribution of fertilizer application and its environmental risk in different provinces of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(18):3596-3605.