

刘方谊, 夏颖, 黄敏, 等. 湖北省三峡库区不同种植模式下农田地表径流氮磷流失特征[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(6): 550-558.

LIU Fang-yi, XIA Ying, HUANG Min, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus losses from farmlands through surface runoff under different cropping patterns in the Three Gorges Reservoir area of Hubei Province[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(6): 550-558.

## 湖北省三峡库区不同种植模式下 农田地表径流氮磷流失特征

刘方谊<sup>1,2</sup>, 夏颖<sup>1,4\*</sup>, 黄敏<sup>2</sup>, 雷秋良<sup>3</sup>, 刘宏斌<sup>3</sup>, 范先鹏<sup>1,4</sup>, 张富林<sup>1,5</sup>, 吴茂前<sup>1,4</sup>

(1.湖北省农业科学院植保土肥研究所, 武汉 430064; 2.武汉理工大学资源与环境工程学院, 武汉 430070; 3.中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 4.湖北省农业面源污染防治工程技术研究中心, 武汉 430064; 5.农业农村部潜江农业环境与耕地保育科学观测实验站, 湖北 潜江 433100)

**摘要:**为了识别湖北省三峡库区氮磷流失的高风险种植模式和高风险区,以种植模式为单元研究区域农田地表径流氮磷流失特征,采用流失系数法,分析了湖北省三峡库区4个县(区)18种主要种植模式农田地表径流途径土壤本底、肥料氮磷流失情况。结果表明:库区农田氮磷流失量分别为2 035.0 t和213.2 t,其中夷陵区最高,分别占库区总量的53.8%和50.5%,该区氮磷流失强度也最高。当季施肥造成的氮磷流失量分别占农田流失总量29.6%和26.3%。18种模式中,平地-露地蔬菜和平地-园地是氮流失量最大的两种种植模式,占库区农田总流失量53.2%;平地-露地蔬菜是磷流失量最大的种植模式,占库区农田总流失量的43.3%。平地、缓坡地、陡坡地三类坡度农田中,平地农业集约程度高,氮磷流失量最高,分别占库区氮磷流失量56.1%和57.1%,缓坡地次之,陡坡地的种植强度低,氮磷流失量最低。几种土地利用方式中,平原旱地利用方式氮磷流失量分别占库区氮磷流失量的38.5%和48.5%,流失强度为17.1、2.3 kg·hm<sup>-2</sup>,远高于园地、坡耕地、水田。研究表明,夷陵区是氮磷流失高风险区,平地-露地蔬菜和平地-园地是氮磷流失的高风险种植模式。

**关键词:**三峡库区;种植模式;地表径流;施肥;氮磷流失

中图分类号:X52

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2018)06-0550-09

doi: 10.13254/j.jare.2018.0030

### Characteristics of nitrogen and phosphorus losses from farmlands through surface runoff under different cropping patterns in the Three Gorges Reservoir area of Hubei Province

LIU Fang-yi<sup>1,2</sup>, XIA Ying<sup>1,4\*</sup>, HUANG Min<sup>2</sup>, LEI Qiu-liang<sup>3</sup>, LIU Hong-bin<sup>3</sup>, FAN Xian-peng<sup>1,4</sup>, ZHANG Fu-lin<sup>1,5</sup>, WU Mao-qian<sup>1,4</sup>

(1. Institute of Plant Protection, Soil and Fertilizer Sciences, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China; 2. School of Resource and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 3. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 4. Hubei Engineering Technology Research Center of Agricultural Non-Point Source Pollution Control, Wuhan 430064, China; 5. Qianjiang Scientific Observing and Experimental Station of Agro-Environment and Arable Land Conservation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, Qianjiang 433100, China)

**Abstract:** Designating cropping patterns as a unit in which to study the characteristics of surface runoff nitrogen and phosphorus losses in the regional field have important guiding significance to manage farmland nutrients and reduce the agricultural non-point source pollution.

收稿日期:2018-01-25 录用日期:2018-03-23

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(201303089);农业部长江中游平原农业环境重点实验室开放基金;国家科技重大专项(2015ZX07103-007-015);湖北省农业科技创新项目(2016-620-000-001-019)

作者简介:刘方谊(1994—),男,硕士研究生,研究方向为水污染治理。E-mail:liufangyi@163.com

\*通信作者:夏颖 E-mail:xiayinghappy105@163.com

By using the loss coefficient method, this paper analyzed the loss of nitrogen and phosphorus in soil background and fertilizer loss in 18 main cropping patterns of 4 counties (districts) in Three Gorges Reservoir area (TGRA) of Hubei Province. The results showed the loss of nitrogen and phosphorus in TGRA were 2 035.0 and 213.2 t, where the Yiling District was the highest, which accounted for 53.8% and 50.5% of the total area, not only had the largest farmland area, but also nitrogen and phosphorus loss intensity was the highest. Flat-open vegetables and flat-garden were the two cropping patterns with the largest nitrogen loss, which accounted for 53.2% of total reservoir loss. Plain-open vegetables were the largest pattern of phosphorus loss, accounting for 43.3% of the TGRA. The fertilizer loss in-season of nitrogen and phosphorus accounted for 29.6% and 26.3% of the total loss respectively. The loss of nitrogen and phosphorus in the flat was the highest among the three kinds of slope farmland (flat, gentle slope land and steep slope divided by cropping patterns) because of high agricultural intensification, which accounted for 56.1% and 57.1% of the total loss, followed by the gentle slope, the steep slope was lowest due to low planting intensity. In all land use, plain dry land accounted for 38.5% and 48.5% of nitrogen and phosphorus loss in TGRA, and the nitrogen and phosphorus loss intensity were 17.1, 2.3 kg·hm<sup>-2</sup>, much higher than that in the garden, sloping fields, and paddy fields.

**Keywords:** Three Gorges Reservoir area; cropping patterns; surface runoff; fertilization; nitrogen and phosphorus losses

地表径流是农田氮磷流失的主要途径<sup>[1-2]</sup>,由地表径流所引起的农田氮磷流失,是造成农业面源污染与地表水体富营养化的主要原因之一<sup>[3]</sup>。金相灿等<sup>[4]</sup>对太湖重点污染控制区调查发现,农田排水中氮和磷的流失量对面源污染贡献率分别占61.5%和19.2%。

地表植被、土壤性质以及耕作管理方式的差异,使得不同种植模式的土壤氮磷流失特征也不同<sup>[5]</sup>。地表径流中的氮磷含量会受到作物种类的影响<sup>[6]</sup>;同时耕作方式对氮磷的流失也有较大的影响,相对于顺坡种植,横坡种植可有效地控制径流并拦截径流中氮磷的流失量,从而降低养分流失的风险<sup>[7-9]</sup>;土壤侵蚀是影响地表径流氮磷流失的重要因素,坡度对土壤侵蚀量及径流变化有显著的影响,土壤侵蚀产沙率在降雨初期急剧上升后迅速下降,随坡度的增加产流时间会有所提前<sup>[10]</sup>,在短陡坡中土壤的泥沙运输还会受到雨水飞溅的影响<sup>[11]</sup>;土地利用方式不同则会使得污染物水平不同,从而导致氮磷流失的差异<sup>[12-13]</sup>。目前国内对不同种植模式下地表径流氮磷流失的相关研究,大都基于某一时段(如汛期、季节等)的观测结果,或是对某一区域单一种植模式下氮磷输出负荷的研究,且多为小区实验和小流域研究,对区域或流域内以主要种植模式为单元的地表径流氮磷流失特征的综合研究较少。

本研究采用流失系数法,综合地形、土地利用类型、耕作方式及作物种类等因素,对湖北省三峡库区4个县(区)18种主要种植模式习惯施肥方式下,农田本底氮磷流失量和当季施肥地表径流氮磷流失量进行分析,识别区域内氮磷流失的高风险种植模式及高风险区,为湖北省三峡库区不同种植模式下农田面源污染的精准防控提供理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

三峡库区位于渝、鄂交界,四川盆地东南边缘山地、川东平行岭谷、鄂西山地向长江中下游平原过渡地带,库区含重庆市22个县(区)、湖北省4个县(区),总面积7.9万km<sup>2</sup>。湖北省三峡库区含宜昌市夷陵区、秭归县、兴山县和恩施州巴东县4个县(区)(图1)。三峡库区地形复杂,大部分地区山高谷深,岭谷相间,区域内地势高差悬殊,呈现山地、丘陵、河谷等多种地貌类型。巴东县、兴山县为鄂西高山地带,平均海拔在1000 m左右,其中夹着长江及支流的河谷;秭归四面高山,中间为盆地地形;而夷陵区则呈西北向东南梯级倾斜,至三峡大坝坝区已是山前丘陵。湖北省三峡库区主要土壤类型有棕壤、紫色土、黄棕壤、石灰土和水稻土等<sup>[14]</sup>。农业生产由地形地势决定,园地占有相当大的比例,且大部分耕地为坡耕地,种植的农作物有玉米、水稻、小麦、红薯、油菜籽、芝麻、花生等。该区域地处我国中亚热带湿润地区,年平均气温14.9~18.5℃,年均降雨量1000~1300 mm,气候特点为冬暖、夏热、春早、秋凉、多雨、霜少、湿度大、云雾多、风力小等,水热条件优越,有明显的垂直气候带,是湖北省最重要的优质柑桔和茶叶生产基地。

### 1.2 研究方法

农田地表径流氮磷负荷的测算采用产排污系数法。以种植模式为单元,先调查每种种植模式的面积,再根据《全国农田面源污染排放系数手册》<sup>[15]</sup>中相对应的每种模式氮磷的流失系数,计算出农田地表径流氮磷的流失量。其中常规流失量为常规施肥情况

下农田一年种植周期内氮磷的流失量,土壤本底流失量为不施肥情况下农田一年种植周期内氮磷流失量。相关计算公式如下:

$$\text{流失量}(t) = \text{流失系数}(kg \cdot hm^{-2}) \times \text{总面积}(hm^2) / 1000$$

$$\text{流失强度}(kg \cdot hm^{-2}) = \text{总流失量}(t) \times 1000 / \text{种植模式的农用地面积}(hm^2)$$

肥料养分流失量(t)=常规施肥流失量(t)-土壤本底流失量(t)。

根据地形、土地利用类型、种植方式及种植制度,湖北省三峡库区农田共划分为18种植模式,其名称与《全国农田面源污染排放系数手册》中南方地区的种植模式名称相对应,各模式的流失系数见表1。每种种植模式的面积以乡镇为单元清查统计,按县(区)

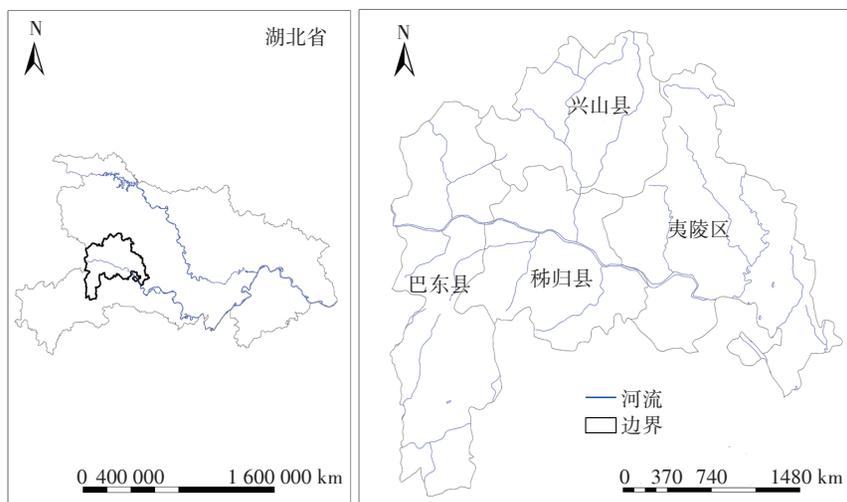


图1 研究区域位置

Figure 1 The geographical position of the research area

表1 湖北省三峡库区不同种植模式农田氮磷流失系数

Table 1 Erosion coefficients of nitrogen and phosphorus in farmland of different cropping patterns in Three Gorges Reservoir area(TGRA) of Hubei Province

种植模式	代码	TN 流失系数/kg·hm <sup>-2</sup>		TP 流失系数/kg·hm <sup>-2</sup>	
		常规施肥情况	农田土壤本底	常规施肥情况	农田土壤本底
缓坡地-非梯田-顺坡-大田作物	NF01	8.99	5.05	0.96	0.72
缓坡地-非梯田-横坡-大田作物	NF02	7.39	7.04	0.72	0.55
缓坡地-梯田-大田作物	NF03	5.45	4.43	0.48	0.28
缓坡地-非梯田-园地	NF04	8.71	7.61	0.88	0.64
缓坡地-梯田-园地	NF05	3.89	3.27	0.20	0.08
缓坡地-梯田-水旱轮作	NF06	4.44	2.87	0.30	0.20
缓坡地-梯田-其他水田	NF07	4.30	2.58	0.42	0.30
陡坡地-非梯田-顺坡-大田作物	NF08	7.64	4.21	1.15	0.63
陡坡地-非梯田-横坡-大田作物	NF09	0.55	0.49	0.06	0.05
陡坡地-梯田-大田作物	NF10	2.73	1.57	0.35	0.20
陡坡地-非梯田-园地	NF11	4.84	3.67	0.31	0.18
陡坡地-梯田-园地	NF12	4.45	2.81	0.55	0.26
陡坡地-梯田-水旱轮作	NF13	0.94	0.56	0.07	0.05
陡坡地-梯田-其他水田	NF14	0.85	0.51	0.12	0.09
平地-露地蔬菜	NS01	40.93	25.40	5.51	4.59
平地-保护地	NS02				
平地-稻油轮作	NS06	23.55	19.62	0.40	0.30
平地-园地	NS11	25.95	19.98	1.85	1.39

注:数据源自《全国农田面源污染排放系数手册》<sup>[15]</sup>。

汇总而成,文中数据为2014年调查数据。根据三峡库区的种植习惯,种植模式中的大田作物以玉米、油菜、马铃薯、红薯、大豆等作物为代表,园地作物以柑桔为代表,水旱轮作以水稻和油菜为代表,水田以水稻为主且两季均为水生作物<sup>[5]</sup>。

### 1.3 研究区域种植面积概况

湖北省三峡库区国土面积为11 532.0 km<sup>2</sup>,农用地(耕地+园地)总面积197 286.0 hm<sup>2</sup>,占国土面积的17.1%,超过了我国农用地占比的平均值(15.0%)<sup>[6]</sup>。由于兴山县和巴东县多为山地且地势陡峭,因此农业相对欠发达,农用地面积仅占其国土面积的11.4%和14.2%,而夷陵区和秭归县的农用地占比皆达到21%(表2)。在所有的种植模式中,陡坡地-非梯田-园地、陡坡地-梯田-大田作物和缓坡地-非梯田-园地的种植面积最广,其种植面积均超过库区农用地面积的10%,分别为13.1%、11.1%和11.1%(表2)。

由于山高坡陡,巴东县和兴山县种植模式相对较少,兴山县主要采用缓坡地-非梯田-横坡-大田作物模式(5360 hm<sup>2</sup>),占农用地总面积20.3%;巴东县则主要采用陡坡地-梯田-大田作物模式(18 580 hm<sup>2</sup>),

占农用地总面积38.9%;夷陵区和秭归县地势上处于山地向丘陵过渡地段,种植模式多样,夷陵区排前三位的模式为缓坡地-非梯田-园地(13 248 hm<sup>2</sup>, 18.4%)、平地-园地(12 985 hm<sup>2</sup>, 18.1%)、平地-露地蔬菜(10 149 hm<sup>2</sup>, 14.1%);秭归县排前三位的模式为陡坡地-非梯田-园地(11 433 hm<sup>2</sup>, 22.3%)、陡坡地-非梯田-顺坡-大田作物(10 059 hm<sup>2</sup>, 19.6%)、陡坡地-梯田-园地(7100 hm<sup>2</sup>, 13.9%)(表2)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 湖北省三峡库区农田氮、磷流失量

#### 2.1.1 地表径流氮流失量

湖北省三峡库区农田地表径流总氮流失量为2 035.0 t(表3)。4个县(区)地表径流氮流失总量由大到小依次为夷陵区(1 094.7 t)>秭归县(394.1 t)>巴东县(311.3 t)>兴山县(235.0 t),与各县(区)农用地面积的排序一致(表2)。夷陵区流失量占全区流失量的53.8%,夷陵区是4个县(区)中唯一的丘陵区,农业集约化程度明显高于其他县(区)。

18种植植模式中,平地-露地蔬菜模式和平地-

表2 湖北省三峡库区各县(区)种植模式面积及占农用地面积比例  
Table 2 Planting pattern area and proportion of land area in TGRA of Hubei Province

种植模式	模式代码	种植面积/hm <sup>2</sup>					占农用地比例/%
		夷陵区	兴山县	秭归县	巴东县	三峡库区合计	
缓坡地-非梯田-顺坡-大田作物	NF01	3053		5733	3000	11 787	6.0
缓坡地-非梯田-横坡-大田作物	NF02	1527	5360	2567	4307	13 760	7.0
缓坡地-梯田-大田作物	NF03	3615	1676	465	1260	7015	3.6
缓坡地-非梯田-园地	NF04	13 248	1305	4667	2760	21 980	11.1
缓坡地-梯田-园地	NF05	2430	2079	1333	1807	7649	3.9
缓坡地-梯田-水旱轮作	NF06	7286	559	333	1333	9511	4.8
缓坡地-梯田-其他水田	NF07	1191	930	533		2654	1.3
陡坡地-非梯田-顺坡-大田作物	NF08	1955		10 059	3333	15 347	7.8
陡坡地-非梯田-横坡-大田作物	NF09	585	2581	1400	920	5486	2.8
陡坡地-梯田-大田作物	NF10	1306	1910	200	18 580	21 996	11.1
陡坡地-非梯田-园地	NF11	7691	2984	11 433	3747	25 855	13.1
陡坡地-梯田-园地	NF12	1832	2846	7100	2753	14 531	7.4
陡坡地-梯田-水旱轮作	NF13	154	494	200	667	1515	0.8
陡坡地-梯田-其他水田	NF14	135	315	2033		2484	1.3
平地-露地蔬菜	NS01	10 149	2654	1477	2467	16 747	8.5
平地-保护地	NS02	324	82		800	1206	0.6
平地-稻油轮作	NS06	2422				2422	1.2
平地-园地	NS11	12 985	663	1692		15 339	7.8
农用地合计/hm <sup>2</sup>		71 889	26 440	51 225	47 733	197 286	—
国土面积/km <sup>2</sup>		3424	2327	2427	3354	11 532	—
农用地占国土面积比例/%		21.0	11.4	21.1	14.2	17.1	

园地模式地表径流氮流失量占该地区地表径流氮流失总量53.2%,分别为685.5 t和398.0 t,显著高于其余16种植模式,这两种模式是该地区地表径流氮流失的重点模式(图2)。

湖北省三峡库区地表径流氮流失总量来源于农田土壤本底的流失量,占常规施肥情况下流失总量70.4%,当季施肥造成的肥料氮流失占农田氮流失总量的29.6%。控制氮肥的投放可以防控当季施肥造成的氮流失,也可以减少氮肥在土壤中残留,从而减少农田土壤本底氮流失。

湖北省三峡库区地表径流氮流失强度平均值为10.3 kg·hm<sup>-2</sup>,4个县(区)流失强度排序为夷陵区(15.2 kg·hm<sup>-2</sup>)>兴山县(8.9 kg·hm<sup>-2</sup>)>秭归县(7.7 kg·hm<sup>-2</sup>)>巴东县(6.5 kg·hm<sup>-2</sup>),兴山县、秭归县和巴东县的总氮流失强度相差不大,夷陵区总氮流失强度最高,与种植模式中露地蔬菜等肥料投入量大的模式所占比重较大有关。

2.1.2 地表径流磷流失量

磷是水体富营养化的主要限制因子<sup>[17]</sup>,因此对磷素的流失特征的探讨显得尤为重要。湖北省三峡库区农田地表径流总磷流失量为213.2 t(表4),4个县(区)总磷流失量与其农用地面积排序一致,由大到小

依次为夷陵区(107.6 t)>秭归县(43.0 t)>巴东县(36.6 t)>兴山县(26.0 t),其中夷陵区流失量占全区流失量的50.5%。在所有的种植模式中,平地-露地蔬菜种植模式地表径流磷流失量达92.3 t,占总流失量的43.3%(图2),露地蔬菜种植模式氮磷流失量高,主要是因为施肥频次高,施肥量大,导致肥料养分利用率低<sup>[18]</sup>。

湖北省三峡库区地表径流磷流失总量来源于农田土壤本底的流失量为157.2 t,常规施肥情况下的流失量为213.2 t,当季肥料磷流失所占比例为26.3%,说明不施肥能减控磷的地表径流流失,而焦少俊等<sup>[19]</sup>研究则表明不施肥可减少34%的磷流失,与本研究结论基本一致。

湖北省三峡库区地表径流磷流失强度为1.1 kg·hm<sup>-2</sup>,4县(区)流失强度分别为夷陵区1.5 kg·hm<sup>-2</sup>,兴山县1.0 kg·hm<sup>-2</sup>,秭归县0.8 kg·hm<sup>-2</sup>以及巴东县0.8 kg·hm<sup>-2</sup>(表4),夷陵区明显高于其他3个县。

2.2 不同坡度农田地表径流氮磷流失量

将湖北省三峡库区农用地按坡度种植模式归类,库区农用地主要以缓坡地(坡度5°~15°)和陡坡地(坡度>15°)为主,分别占农用地的37.7%和44.2%,而平地(坡度≤5°)占比较少,仅有18.1%(表5)。

表3 湖北省三峡库区地表径流氮流失情况

Table 3 Nitrogen loss of surface runoff in TGRA of Hubei Province

县(区)	常规流失量/t	农田土壤本底氮流失		当季施肥造成氮流失		流失强度/kg·hm <sup>-2</sup>
		流失量/t	占总流失量比例/%	流失量/t	占总流失量比例/%	
夷陵区	1 094.7	783.7	71.6	311.0	28.4	15.2
兴山县	235.0	170.2	72.4	654.8	27.6	8.9
秭归县	394.1	268.9	68.3	125.2	31.8	7.7
巴东县	311.3	209.8	67.4	101.5	32.6	6.5
三峡库区	2 035.0	1 432.6	70.4	602.4	29.6	10.3

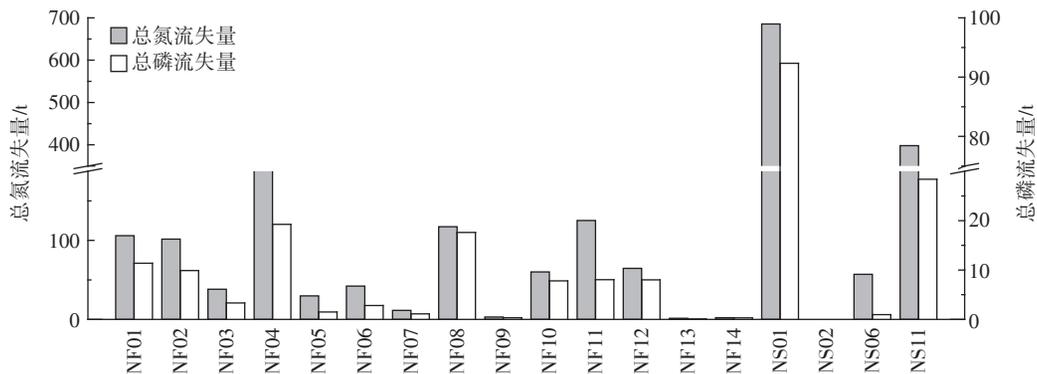


图2 湖北省三峡库区不同种植模式氮磷地表径流流失量

Figure 2 Total nitrogen and phosphorus loss of surface runoff in TGRA of Hubei Province under different cropping patterns

由表6可知,不同坡度下农田地表径流总氮流失总量由大到小依次为平地(1 140.5 t)、缓坡地(520.7 t)、陡坡地(373.8 t),总磷流失量大小依次为平地(121.7 t)、缓坡地(49.3 t)、陡坡地(42.2 t);其中平地上总氮流失量占全区流失量的56.1%,总磷流失量占57.1%。

平地上地表径流氮磷流失总量最高,主要是因为平地氮磷流失强度最高(表6),且与缓坡地和陡坡地相比,平地上皆为高流失系数的种植模式。相同的土壤条件和降雨动力条件下,坡度越大,氮磷的流失量越大<sup>[20]</sup>,但是在长期的农业生产过程中,往往由于平地土层深厚,易于耕种,农业集约化程度高,土壤积累的氮磷养分远远高于坡地土壤<sup>[21]</sup>,为农田地表径流氮磷流失提供了物质基础。

不同坡度条件下,肥料氮流失量占比表现为陡坡

地(36.0%)>平地(31.7%)>缓坡地(20.5%),磷流失量占比表现为陡坡地(45.6%)>缓坡地(28.4%)>平地(18.7%)。这是由于在径流中氮流失形态主要为溶解态氮<sup>[22]</sup>,且降雨为氮流失的主要驱动力<sup>[23]</sup>,而土壤具有很强的磷固定能力<sup>[24]</sup>,使得土壤中磷随径流流失的主要载体为泥沙<sup>[25]</sup>,因此径流中磷的流失形态主要为颗粒态,故总磷流失量主要由泥沙流失量及其所吸附的磷素物质所决定<sup>[26]</sup>。在赵龙山等<sup>[27]</sup>的研究中,坡度5°~15°(缓坡地)之间,产流量随坡度增加呈减小趋势,当坡度大于15°(陡坡地)后,产流量逐渐增加,而产沙量却随着坡度的增加而呈现增加的趋势;同时缓坡与陡坡的种植模式仅有大田作物、园地、水田3种,但缓坡地中水田种植面积占比为16.4%,陡坡地仅为4.6%,而水田具有良好的水土保持作用<sup>[28]</sup>,可拦截坡耕地冲蚀的泥沙<sup>[28]</sup>,因此缓坡地总磷的肥料流失比例

表4 湖北省三峡库区地表径流磷流失量情况

Table 4 Phosphorus loss of surface runoff in TGRA of Hubei Province

县(区)	常规流失量/t	农田土壤本底磷流失		当季施肥造成磷流失		流失强度/kg·hm <sup>-2</sup>
		流失量/t	占总流失量比例/%	流失量/t	占总流失量比例/%	
夷陵区	107.6	83.2	77.3	24.4	22.7	1.5
兴山县	26.0	19.7	75.9	6.3	24.1	1.0
秭归县	43.0	28.6	66.5	14.4	33.5	0.8
巴东县	36.6	25.6	70.1	10.9	29.9	0.8
三峡库区	213.2	157.2	73.7	56.0	26.3	1.1

表5 湖北省三峡库区各县(区)不同坡度农用地面积

Table 5 Farmland area of different slopes in TGRA of Hubei Province

县(区)	平地(≤5°)		缓坡地(5°~15°)		陡坡地(>15°)	
	面积/hm <sup>2</sup>	占比/%	面积/hm <sup>2</sup>	占比/%	面积/hm <sup>2</sup>	占比/%
夷陵区	25 880	36.0	32 350	45.0	13 659	19.0
兴山县	3400	12.9	11 910	45.0	11 131	42.1
秭归县	3168	6.2	15 631	30.5	32 425	63.3
巴东县	3267	6.8	14 467	30.3	30 000	62.9
库区合计	35 715	18.1	74 358	37.7	87 215	44.2

表6 湖北省三峡库区不同坡度氮磷的流失量及流失比例

Table 6 Nitrogen and phosphorus loss and its ratio in different slopes in TGRA of Hubei Province

项目	坡度	常规流失量/t	农田土壤本底流失		当季施肥造成流失		流失强度/kg·hm <sup>-2</sup>
			流失量/t	占总流失量比例/%	流失量/t	占总流失量比例/%	
总氮	平地	1 140.5	779.3	68.3	361.3	31.7	31.9
	缓坡地	520.7	413.9	79.5	106.8	20.5	7.0
	陡坡地	373.8	239.4	64.1	134.4	36.0	4.3
总磷	平地	121.7	98.9	81.3	22.8	18.7	3.4
	缓坡地	49.3	35.3	71.6	14.0	28.4	0.7
	陡坡地	42.2	23.0	54.5	19.2	45.5	0.5

相对较低。

### 2.3 库区农用地不同土地利用方式氮磷流失量

按土地利用方式(园地、平原旱地、坡耕地、水田和保护地)将18种植植模式归类,发现湖北省三峡库区不同土地利用方式农田地表径流氮流失总量为园地(809.1 t)>平原旱地(783.8 t)>坡耕地(327.9 t)>水田(114.2 t);而磷流失总量则为平原旱地(103.5 t)>园地(65.2 t)>坡耕地(39.2 t)>水田(5.3 t)(表7)。园地和平原旱地方式氮流失量分别占库区氮流失量的39.8%和38.5%,是防控氮流失的重点土地利用方式;平原旱地磷流失量占库区磷流失的48.5%,是防控磷流失的重点土地利用方式。

氮磷流失总量决定因素:其一是种植模式的面积,湖北省三峡库区园地种植面积最大,占农用地43.3%,坡耕地和平原旱地种植面积相近,分别占农用地比例23.5%和23.2%,水田较少,占比为9.4%,保护地面积最小,仅有0.6%(图3);其二是受流失强度的影响,氮磷的流失强度都以平原旱地为最高,氮为 $17.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,磷为 $2.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,坡耕地和园地的氮磷流失强度相差不大,水田的氮磷流失强度最低。总之,从田块尺度来看,平原旱地种植模式的氮磷流失强度都是最高,主要原因在于平原旱地地势平坦,土地肥沃,农业种植集约化程度高,肥料投入量大。

平原旱地当季肥料氮流失比例最高,达37.4%,而肥料磷流失比例却是最低的,仅有19.6%(表7),其原因是平原旱地种植业集约化程度高,施肥量大,所以氮磷流失量很高,且流失强度最大;平原旱地的作物主要为蔬菜和大田作物,而蔬菜的磷肥施用量大<sup>[30]</sup>,积累速度快,连续施用磷肥扩大了土壤中的有效磷库<sup>[31]</sup>。研究<sup>[32-34]</sup>表明,平地土壤的侵蚀程度弱、产沙量低,导致磷素的流失仅有一小部分随着降雨径

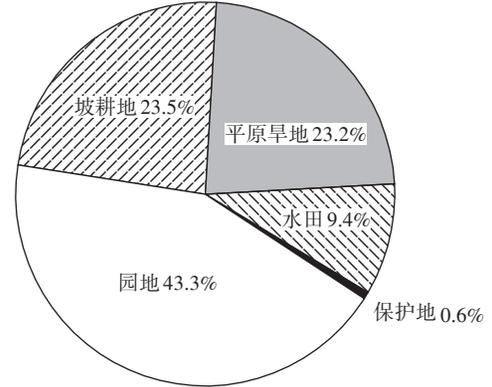


图3 湖北省三峡库区不同土地利用方式面积占农用地比例  
Figure 3 The ratio of land use to farmland in TGRA of Hubei Province

流流失,因此在种植业发达的平原旱地土壤中通常积累了大量的磷,使得平原旱地磷的本底流失量远高于肥料流失量。

### 3 结论

(1)湖北省三峡库区农田氮磷流失总量分别为2 035.0 t和213.2 t,其中夷陵区氮磷流失量和流失强度高高于其他县(区),是高流失风险区。

(2)湖北省三峡库区农田土壤本底氮流失和当季施肥氮流失分别占农田地表径流氮磷流失的70.4%和29.6%,磷分别占73.7%和26.3%,肥料投入是种植业中影响氮磷流失的重要因素。

(3)18种植植模式中,平地-露地蔬菜和平地-园地模式是库区氮流失高风险种植模式,平地-露地蔬菜模式是库区磷流失高风险种植模式。

(4)平地为高流失系数种植模式,农业集约程度高,氮磷流失量最高,陡坡地和缓坡地种植模式流失系数较低,且陡坡地的种植强度低,氮磷流失量最

表7 湖北省三峡库区不同土地利用方式氮磷流失量及流失比例

Table 7 Nitrogen and phosphorus loss and its loss ratio in different land use patterns in TGRA of Hubei Province

项目	土地利用方式	常规流失量/t	农田土壤本底流失		当季施肥造成流失		流失强度/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$
			流失量/t	占总流失量比例/%	流失量/t	占总流失量比例/%	
总氮	园地	809.1	634.4	78.4	174.8	21.6	9.5
	坡耕地	327.9	223.7	68.2	104.2	31.8	7.1
	平原旱地(含梯田)	783.8	490.8	62.6	293.0	37.4	17.1
	水田	114.2	83.8	73.4	30.4	26.6	6.2
总磷	园地	65.2	44.3	68.0	20.9	32.0	0.8
	坡耕地	39.2	26.0	66.3	13.2	33.8	0.9
	平原旱地(含梯田)	103.5	83.2	80.4	20.3	19.6	2.3
	水田	5.3	3.7	69.8	1.6	30.2	0.3

低。当季肥料氮流失量所占比例:陡坡地>平地>缓坡地,磷流失量所占比例:陡坡地>缓坡地>平地。

(5)平原旱地和园地的总氮流失量最高,平原旱地的总磷流失量最高,平原旱地的氮磷流失强度也远高于其他的土地利用方式,故平原旱地应是种植业氮磷流失的重点控制对象。

#### 参考文献:

- [1] 朱继业, 高超, 朱建国, 等. 不同农地利用方式下地表径流中氮的输出特征[J]. 南京大学学报(自然科学), 2006, 42(6): 621-627.  
ZHU Ji-ye, GAO Chao, ZHU Jian-guo, et al. Nitrogen exports via overland runoff under different land uses and their seasonal pattern[J]. *Journal of Nanjing University(Natural Sciences)*, 2006, 42(6): 621-627.
- [2] 许其功, 刘鸿亮, 沈珍瑶, 等. 三峡库区典型小流域氮磷流失特征[J]. 环境科学学报, 2007, 27(2): 326-331.  
XU Qi-gong, LIU Hong-liang, SHEN Zhen-yao, et al. Characteristics on nitrogen and phosphorus losses in the typical small watershed of the Three Georges Reservoir area[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(2): 326-331.
- [3] Douglas C L, King K A, Zuzel J F. Nitrogen and phosphorus in surface runoff and sediment from a wheat-pea rotation in northeastern Oregon [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1998, 27(5): 1170-1177.
- [4] 金相灿, 叶春, 颜昌宙, 等. 太湖重点污染控制区综合治理方案研究[J]. 环境科学研究, 1999, 12(5): 1-5.  
JIN Xiang-can, YE Chun, YAN Chang-zhou, et al. Comprehensive treatment plan for key-polluted regions of Lake Taihu[J]. *Research of Environmental Sciences*, 1999, 12(5): 1-5.
- [5] 罗艺, 吴福忠, 杨万勤, 等. 四川盆地紫色丘陵区不同种植模式下氮流失特征[J]. 环境科学学报, 2010, 30(11): 2221-2228.  
LUO Yi, WU Fu-zhong, YANG Wan-qin, et al. N losses from different cropping modes in the purple hilly region of the Sichuan Basin[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(11): 2221-2228.
- [6] 焦平金, 许迪, 王少丽, 等. 汛期不同作物种植模式下地表径流氮磷流失研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(2): 15-20.  
JIAO Ping-jin, XU Di, WANG Shao-li, et al. Nitrogen and phosphorus runoff losses from farmland as affected by cropping pattern during flood season[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(2): 15-20.
- [7] 于兴修, 马骞, 刘前进, 等. 横坡与顺坡垄作径流氮磷输出及其富营养化风险对比研究[J]. 环境科学, 2011, 32(2): 428-436.  
YU Xing-xiu, MA Qian, LIU Qian-jin, et al. Comparative study of N, P output and eutrophication risk in runoff water in cross ridge and longitudinal ridge[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(2): 428-436.
- [8] 刘宗岸, 杨京平, 杨正超, 等. 苕溪流域茶园不同种植模式下地表径流氮磷流失特征[J]. 水土保持学报, 2012, 26(2): 29-32.  
LIU Zong-an, YANG Jing-ping, YANG Zheng-chao, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus losses with surface runoff in tea field of Tiaoxi Watershed under different planting patterns[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(2): 29-32.
- [9] 窦培谦, 王晓燕, 秦福来, 等. 农业非点源氮磷流失规律研究[J]. 安徽农学通报, 2005, 11(4): 151-153.  
DOU Pei-qian, WANG Xiao-yan, QIN Fu-lai, et al. Research on loss of nitrogen and phosphorus in watershed[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2005, 11(4): 151-153.
- [10] 张会茹, 郑粉莉. 不同降雨强度下地面坡度对红壤坡面土壤侵蚀过程的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(3): 40-43.  
ZHANG Hui-ru, ZHENG Fen-li. Effect of slope gradients on erosion from a red soil hillslope under different rainfall intensity[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(3): 40-43.
- [11] Fu S H, Liu B Y, Liu H P, et al. The effect of slope on interrill erosion at short slopes[J]. *Catena*, 2011, 84(1): 29-34.
- [12] Johnes P J. Evaluation and management of the impact of land use change on the nitrogen and phosphorus load delivered to surface waters: The export coefficient modeling approach[J]. *Journal of Hydrology*, 1996, 183(3/4): 323-349.
- [13] Tong S T, Chen W. Modeling the relationship between land use and surface water quality[J]. *Journal of Environmental Management*, 2002, 66(4): 377-393.
- [14] 徐胜祥, 贺立源, 黄魏, 等. 基于MapXtreme的湖北三峡库区土壤资源信息系统的设计与实现[J]. 土壤, 2006, 38(2): 210-216.  
XU Sheng-xiang, HE Li-yuan, HUANG Wei, et al. Designing and materialization of MapXtreme-based soil resource information system of the Three-Gorge Reservoir region, Hubei[J]. *Soils*, 2006, 38(2): 210-216.
- [15] 任天志, 刘宏斌, 范先鹏, 等. 全国农田面源污染排放系数手册[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015: 33-58.  
REN Tian-zhi, LIU Hong-bin, FAN Xian-peng, et al. Handbook of farmland non-point source pollution emission coefficient in China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2015: 33-58.
- [16] 卢树昌, 赵淑杰. 我国农业用地资源利用现状及合理利用的基本对策[J]. 天津农学院学报, 1999(1): 42-45.  
LU Shu-chang, ZHAO Shu-jie. Present situation of agricultural land resources use and basic measures for reasonable use in China[J]. *Journal of Tianjin Agricultural University*, 1999(1): 42-45.
- [17] Liu J Z, Luo X X, Zhang N M, et al. Phosphorus released from sediment of Dianchi Lake and its effect on growth of *Microcystis aeruginosa* [J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2016, 23(16): 16321-16328.
- [18] 沈连峰, 苗蕾, 韩敏, 等. 河南省淮河流域不同土地利用类型氮磷流失的特征分析[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4): 77-80.  
SHEN Lian-feng, MIAO Lei, HAN Min, et al. Characteristics analysis of nitrogen and phosphorus loss about different land use types of Huaihe River Basin in Henan Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(4): 77-80.
- [19] 焦少俊, 胡夏民, 潘根兴, 等. 施肥对太湖地区青紫泥水稻土稻季农田氮磷流失的影响[J]. 生态学杂志, 2007, 26(4): 495-500.  
JIAO Shao-jun, HU Xia-min, PAN Gen-xing, et al. Effects of fertilization on nitrogen and phosphorus run-off loss from Qingzini paddy soil in Taihu Lake region during rice growth season[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(4): 495-500.
- [20] 程文娟, 史静, 夏运生, 等. 滇池流域农田土壤氮磷流失分析研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(5): 52-55.

- CHENG Wen-juan, SHI Jing, XIA Yun-sheng, et al. Farmland runoff of nitrogen and phosphorus in Dianchi Watershed[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(5):52-55.
- [21] 唐 将, 李 勇, 邓富银, 等. 三峡库区土壤营养元素分布特征研究[J]. 土壤学报, 2005, 42(3):473-478.
- TANG Jiang, LI Yong, DENG Fu-yin, et al. Distribution characteristics of nutrition elements in the Three Gorges Reservoir district[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(3):473-478.
- [22] 华玲玲, 李文超, 翟丽梅, 等. 三峡库区古夫河小流域氮磷排放特征[J]. 环境科学, 2017, 38(1):138-146.
- HUA Ling-ling, LI Wen-chao, ZHAI Li-mei, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus emissions in the Gufu River small watershed of the Three Georges Reservoir area[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(1):138-146.
- [23] Zeng S C, Su Z Y, CHEN B G, et al. Nitrogen and phosphorus runoff losses from orchard soils in south China as affected by fertilization depths and rates[J]. *Pedosphere*, 2008, 18(1):45-53.
- [24] Sharpley A, Beegle D, Bolster C, et al. Phosphorus indices: Why we need to take stock of how we are doing[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2012, 41(6):1711-1719.
- [25] Wu L, Long T Y, Liu X, et al. Modeling impacts of sediment delivery ratio and land management on adsorbed non-point source nitrogen and phosphorus load in a mountainous basin of the Three Gorges Reservoir area, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 70(3):1405-1422.
- [26] 孙正宝, 陈治谏, 廖晓勇, 等. 三峡库区典型小流域农业非点源氮磷流失特征[J]. 生态学杂志, 2011, 30(8):1720-1725.
- SUN Zheng-bao, CHEN Zhi-jian, LIAO Xiao-yong, et al. Characteristics of agricultural non-point source nitrogen and phosphorus losses in a typical small watershed in Three Georges Reservoir area[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(8):1720-1725.
- [27] 赵龙山, 侯 瑞, 吴发启, 等. 坡度对农业耕作措施水土保持作用的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3):69-72.
- ZHAO Long-shan, HOU Rui, WU Fa-qi, et al. Effects of slope gradient on soil and water conservation benefit of tillage practices in agricultural lands[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(3):69-72.
- [28] 杨志新, 郑大玮, 文 化. 北京郊区农田生态系统服务功能价值的评估研究[J]. 自然资源学报, 2005, 20(4):564-571.
- YANG Zhi-xin, ZHENG Da-wei, WEN Hua. Studies on service value evaluation of agricultural ecosystem in Beijing region[J]. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(4):564-571.
- [29] 焦菊英, 王万中, 李 靖. 黄土丘陵区不同降雨条件下水平梯田的减水减沙效益分析[J]. 水土保持学报, 1999, 5(3):59-63.
- JIAO Ju-ying, WANG Wan-zhong, LI Jing. Analysis on soil and water conservation benefit of level terrace under different rainfall condition in loess Hilly Region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1999, 5(3):59-63.
- [30] 于群英, 李孝良, 陈世勇, 等. 长期施肥对菜地土壤磷素积累的影响[J]. 华北农学报, 2012, 27(6):196-201.
- YU Qun-ying, LI Xiao-liang, CHEN Shi-yong, et al. Effect of long-term fertilization on phosphorus accumulation in vegetable soils[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2012, 27(6):196-201.
- [31] 李新乐, 侯向阳, 穆怀彬, 等. 连续6年施磷肥对土壤磷素积累、形态转化及有效性的影响[J]. 草业学报, 2015, 24(8):218-224.
- LI Xin-le, HOU Xiang-yang, MU Huai-bin, et al. P fertilization effects on the accumulation, transformation and availability of soil phosphorus[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, 24(8):218-224.
- [32] 王全九, 穆天亮, 王 辉. 坡度对黄土坡面径流溶质迁移特征的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(4):176-179.
- WANG Quan-jiu, MU Tian-liang, WANG Hui. The effects of slope on solute concentration in runoff on the loess slope[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(4):176-179.
- [33] 王 丽, 王 力, 王全九. 不同坡度坡耕地土壤氮磷的流失与迁移过程[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2):69-75.
- WANG Li, WANG Li, WANG Quan-jiu. The processes of nitrogen and phosphorus loss and migration in slope cropland under different slopes[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(2):69-75.
- [34] 黄利玲, 王子芳, 高 明, 等. 三峡库区紫色土旱坡地不同坡度土壤磷素流失特征研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(1):30-33.
- HUANG Li-ling, WANG Zi-fang, GAO Ming, et al. Study on phosphorus loss characteristics from different slopes in purple soil sloping upland of Three Gorges Reservoir region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(1):30-33.