

耕作侵蚀及其农业环境意义

李 勇¹, 张建辉¹, 罗大卫(Lobb D.A.)², 张建国¹

(1 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041;

2 加拿大 Manitoba 大学土壤科学系, 加拿大 曼利托巴)

摘 要: 21 世纪来临之际, 耕作研究和耕作习惯将发生重大变化。这一革命性变化的驱动力是人们对耕作位移与耕作侵蚀及其农业持续性和环境保护的日益了解和认识。耕作位移是耕作活动造成的土壤移动。因受耕作工具的设计、操作、景观地形和土壤性质等因素的影响, 耕作位移在景观内变异很大。耕作位移在景观内的变化导致净土壤重新分配, 即耕作侵蚀。典型的情况是耕作连续地导致土壤顺坡移动, 造成土壤在坡上部严重流失, 而在坡下部堆积。本文描述了耕作位移和耕作侵蚀过程, 概括了其最新研究进展, 阐述了耕作侵蚀对作物生产力和温室效应等的农业环境意义, 提出了土壤侵蚀研究者面临的挑战和机遇。

关键词: 耕作侵蚀; 耕作位移; 农业生态系统

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

数世纪以来, 土壤耕作已经成为作物生产不可分割的部分, 并发展、演化为一门科学。耕作研究, 是建立在对耕作与土壤物理性质、作物生长、土壤侵蚀及其土壤的碳化作用相互关系的了解基础上的科学。大量事实证明, 耕作研究已经成熟、接近其知识的宽度和深度的界限。识别与耕作相关的两个过程极大可能改变未来耕作研究的方向。这两个过程就是耕作位移与耕作侵蚀。

本文的目的是: 1) 描述耕作位移与耕作侵蚀的过程; 2) 介绍其研究现状; 3) 评价耕作侵蚀的严重程度; 4) 论述耕作位移与耕作侵蚀的农业环境意义。

1 耕作侵蚀过程

1.1 耕作位移

耕作位移系指因耕作造成的土壤位置移动(图 1), 可以用相对于耕作方向的某一特定方向的土壤移动量来表征, 即每米耕作宽度土壤向前(与耕作方向平行)的土壤位移量或每米耕作长度土壤向侧面(与耕作方向垂直)的输送量。耕作位移也可以用平均耕作深度, 即耕作层向前或向侧面移动的距离来表示。但这两种表达方式均不能完全准确地描述耕作位移的特征。例如, 用凿犁犁耕一次, 可使 70 kg 每米耕作宽度的土壤向前移动, 其平均向前移动的距离为 40 cm。但这 70 kg 土壤中一部分位移距离少则在 5 cm 左右, 而另一部分向前移动最远可达 300 cm。土壤位移因耕作工具的宽度不同有很大差异。因此, 所有耕作位移的度量都是以单位耕作宽度为基础的。耕作位移是非常重要的, 其重要性在于它直接影响到土壤组分的扩散或混合的距离。

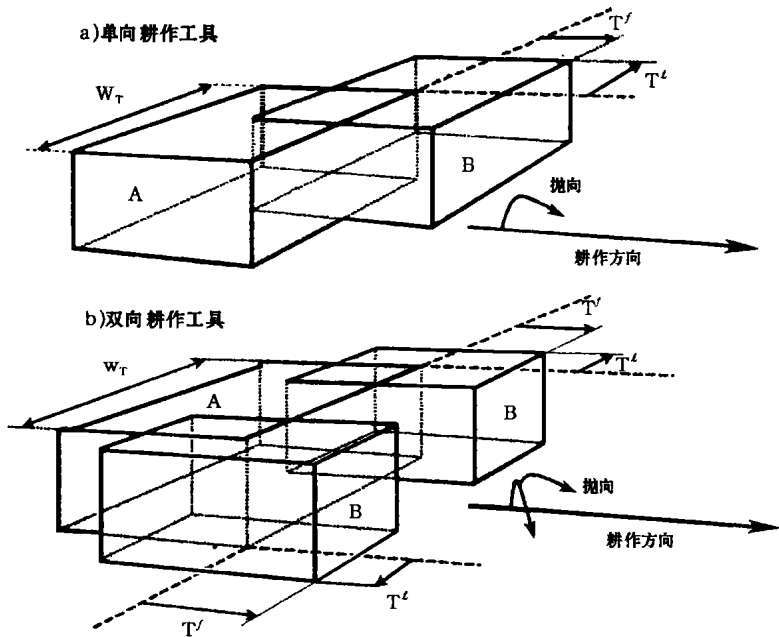
1.2 耕作侵蚀

受诸多因素的影响, 耕作引起的土壤位移在景观内变化很大。这些因素包括: 耕作工具的设计与操作方式、景观的地形和土壤性质。耕作位移在景观内的变化导致净余土壤的重新分配, 即耕作侵蚀。典型的情况是耕作连续地导致土壤顺坡移动, 造成土壤在坡上部严重流失, 而在坡下部堆积(图 2)。耕作侵蚀的表示方法与水蚀和风蚀的相似, 例如可以用单位面积土壤质量的变化或高度的变化量来表示。

收稿日期: 2000-07-14。

基金项目: 中国科学院山地环境学“百人计划”(1999 年度)资助。

作者简介: 李勇(1958-), 男(汉族), 陕西省蒲城县人, 博士, 研究员, 洪堡学者。入选中国科学院“百人计划”、“引进国外杰出人才”和农业部“神农计划”, 在 SCI 收录刊物发表论文 5 篇, 撰写国家基金资助优秀成果专著 1 部。



A= 土壤的原始位置(initial position of soil volume); B= 土壤移动后的位置(final position)。T^f= 前后移动(forward translocation)。T^l= 侧向移动(lateral translocation), W_r= 单位耕作宽度(unit width of tillage)

Fig. 1 Simple illustration of soil translocation by tillage.

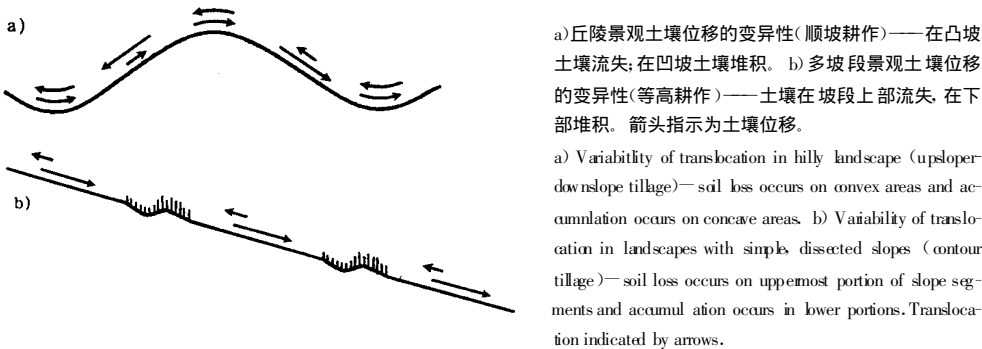


Fig. 2 Simple illustration of tillage erosion

耕作侵蚀可见的证据包括: 在山脊或山丘的顶部富含有机质的表层土壤流失和心土层出露地表; 下坡一边的田地边界(如篱笆线、梯田)被削低了, 而上坡一边的田地边被埋没。

2 研究现状

世界上最早关于耕作位移和耕作侵蚀的研究是 1930~1940 年间在北美进行的。1934 年, Nichols 和 Reed 测定了耕作引起的土壤位移的大小, 随后, Mech 和 Free (1942)测定了坡度对耕作位移的影响^[1]。但是, 后来的近 50 年在北美未见对耕作位移和耕作侵蚀研究的任何报道, 在这一段时期内, 相当多的耕

作侵蚀的研究却在东欧完全独立地进行着^[2-5]。直到二十世纪 80 年代末、90 年代初,北美和西欧的研究者才“发现”了这些研究工作。在 80 年代末 90 年代初,几个西欧和北美的研究者开始调查耕作引起的土壤的移动及其相关的侵蚀^[6-8]。这些研究很好地解释了耕种农业景观水蚀和风蚀过程无法解释的土壤的重新分布格局。凸面景观位置严重的侵蚀决定了耕种景观土壤重新分布的特征。水蚀引起景观土壤流失最为严重的地带是坡下部,而不是在坡上部或山顶。尽管风蚀最为严重的地带往往在景观的上部,但大量观察获得的土壤分布格局和速率排除了风蚀作为这一耕种景观土壤流失的主要原因。实验发现,细沙与砾石粘壤土、有遮蔽和没遮蔽的山顶部的土壤流失同样严重,土壤重新分布的格局和强度与耕作侵蚀密切相关。

近 10 a 的研究证明,耕作侵蚀的重要形式,是总土壤侵蚀量的一个主要贡献者。Lindstrom *et al.*^[6,9], Poesen *et al.*^[10] 和 Thapa *et al.*^[11], 都检验了顺坡或等高耕作时耕作位移与坡度的关系。Lobb 等^[12] 确定了耕作位移与坡度曲率、耕作速度和深度之间的关系。Lobb *et al.*^[13] 和 Montgomery *et al.*^[14] 研究了复杂农业坡地景观耕作位移与土壤容重、土壤温度的关系。Van Muysen *et al.*^[15] 调查了土壤结构对土壤位移的影响,结果表明疏松土壤耕作时,土壤位移大于紧实土壤。与水蚀的研究相比,从事耕作侵蚀的研究人员是非常少的,但目前正在迅速增加。

3 耕作侵蚀的重要性

在复杂地形景观内,耕作侵蚀造成的最大土壤流失量一般在 $15\text{ t/hm}^2\cdot\text{a}^{-1} \sim 150\text{ t/hm}^2\cdot\text{a}^{-1}$ 之间^[13-18]。这样的土壤流失速率是维持作物持续生产的土壤量的数倍。研究发现,主要的土壤流失出现在坡地凸起的位置。利用¹³⁷Cs 示踪技术研究表明,在凸坡位置的土壤流失量的 70 % ~ 100 % 是直接由耕作侵蚀引起的^[13,16]。King *et al.*^[19] 利用 Lobb *et al.*^[12,16] 提供的耕作位移资料,耕作侵蚀危险指标模型、1996 年农业普查数据及来自国家土壤数据库的景观数据分析认为:在加拿大大约有 50 % 的农地正遭受着严重的耕作侵蚀。Shelton *et al.*^[20] 发现,仅 15 % 的农地水蚀相当严重。

在加拿大,水蚀引起土壤流失的面积大约占总面积的 50 %,主要在坡背部和坡脚,而耕作侵蚀引起土壤流失的面积大约占总面积 25 %,主要在坡顶和坡肩部位。King 和 Shelton 的分析结果表明,在 1981 ~ 1996 年间,水蚀和耕作侵蚀的危险性均在减小。水蚀和耕作侵蚀的危险性降低的原因是由于实施了土壤保持耕作措施。King 和 Shelton 的分析是以假定其研究地区在 1981 年没有实施土壤保持耕作措施为基础的。自 1996 年以来,在加拿大进行土壤保持耕作的范围是非常有限的。因此,由耕作引起的土壤退化仍在日益扩大。

4 耕作侵蚀的农业环境意义

4.1 耕作侵蚀的危害和严重程度

所有地形复杂的农业耕作景观都会发现不同程度的耕作侵蚀。虽然耕作侵蚀研究主要集中在“坡地景观”,但是“平地景观”上的耕作侵蚀同样具有重要意义。北美的红河谷是一个平坦地貌景观,其相对高差 $< 1/1000$,但它的地形却十分复杂。在这样一个平地景观上,超过 20 m 宽度的农业耕作随处可见。耕作侵蚀致使土壤不断充填地表排水沟渠,所以人们必须定期清理排水沟内的土壤等充填物质,从而大大地增加了这一平地景观地形的复杂性。在一些修建梯田、缓冲带的简单山坡,耕作侵蚀可能更为严重。田地边界将斜坡切为几段,耕作导致土壤在每一个边界上坡位流失而在下坡位堆积(图 2b)。总的土壤流失量在整个坡地上的土壤流失量随斜坡分段数量的增加而增加。这一结果已经被许多学者^[11,14,21,22] 所证实。无论使用何种耕作工具,即任何形式的耕作均会发生耕作侵蚀。耕作次数越多,耕作侵蚀的严重性和危害性也就越大。

4.2 对土壤景观变异性的影响

耕作位移与耕作侵蚀对土壤空间变异性有完全不同的影响。耕作侵蚀增加了土壤性质在景观内的变异性。当耕作侵蚀发生时,坡地凸坡部位的心土层就会不断地暴露在地表。例如,常常可以看到山地

景观上有圈状晕轮分布的现象: C 层的白色—黄色土壤物质暴露在山顶, 而 A 层的黑色—棕色土壤物质出现在山脚, 来自 B 层的红色—棕色土壤物质却分布在山腰部位。与耕作侵蚀相反, 耕作位移通过使土壤在较大距离范围内的重新分布而减小了土壤的空间变异性。Lobb *et al.* 发现, 一次耕作可以使 3 m 长度范围之内的土壤混合, McLeod 等证明, 若以 15 cm 犁耕深度和每小时 5 km 的速度耕作一次, 可以使土壤位置移动达 4 m 之远。Sibbesen 详细说明了耕作位移在土壤及其组成成份传播扩散的重要性, 并建立了一个模型来预测小区土壤长期扩散情况。耕作对土壤空间变异性的这两种不同影响最早被 Kachanoski 所认识, 最近李勇等人^[23]对其作了进一步的定量评价。结果表明, 黄土高原陡坡耕种景观土壤养分的空间变异性主要是受耕作侵蚀控制。

4.3 耕作侵蚀对作物生产的影响

Lobb *et al.* 发现, 加拿大农作物产量 40 % ~ 50 % 的降低与凸面景观位置严重的侵蚀相关。如果以在凸面斜坡年平均产量损失占该数值一半计算, 耕作侵蚀造成凸面坡位作物产量损失占研究景观总产量损失的 25 %, 耕作侵蚀每年引起的作物减产占整个地区作物产量总损失的 5 %。由耕作侵蚀导致的这种损失在集约型农业耕作地区每年达几千万美元。同时, 耕作侵蚀增加了土壤的变异性, 导致生产投入提高, 增大了产品成本。而且耕作侵蚀降低了化肥、农药的有效利用率, 加剧了对地表水资源的污染。如何控制与耕作侵蚀相关的土壤流失, 将是实施精准农业管理工程的关键。

4.4 对风蚀和水蚀的影响

耕作侵蚀使可蚀性高的心土或亚表土层出露地表, 加速了土壤水蚀和风蚀。耕作侵蚀具有对水蚀输送物质的作用机制, 将土壤输送到地表径流会聚的区域, 即, 细沟和集水地带^[17, 18, 24~29]。对细沟侵蚀的物质输送来说, 耕作侵蚀所起的作用要比细沟间侵蚀所起的作用更为重要。

4.5 对土壤景观生物物理过程的影响

与水蚀和风蚀对作物生产的影响比较, 耕作侵蚀对土壤景观的生物物理过程具有重要的潜在影响。在坡上部景观位置表层土壤的流失及由此引起的土壤性质的变化影响了整个景观的水文学过程。典型的情况是, 侵蚀土壤的入渗能力下降增加了坡下部的地表径流。此外, 这些侵蚀土壤的持水性显著降低, 土壤水分条件的变化影响了土壤温度的变化。在景观内土壤重新分配过程中, 耕作侵蚀使得凸坡位置的营养物质如碳、氮等被流失耗尽, 而在凹坡位置发生营养物质的堆积和富集, 这种组合作用对诸如温室气体的产生和释放等生物物理过程具有重要的影响。

4.6 对土壤侵蚀评价技术的影响

土壤组成如有机质和 ¹³⁷Cs 含量的变化常作为土壤侵蚀的评价指标。但是, 土壤组分浓度的降低会出现在一个没有土壤质量变化的特殊景观位置。耕作使土壤从某点移动到土壤组分含量不一定相同的另一位置。耕作位移导致土壤组分的变化, 而这些组分的变化常常用于评价这些点或其周围地区的土壤流失情况。显然, 这种现象对应用 ¹³⁷Cs 和其他改进技术评估土壤侵蚀有很大的影响^[16, 22, 27]。

4.7 对土壤侵蚀模型的影响

不包含耕作侵蚀过程的土壤侵蚀模型不能够真实地反映复杂地形农业景观土壤的侵蚀状况。Govers 等^[18], Quine 等^[25] 和 Schumacher 等^[26] 研究表明, 评价农耕地侵蚀状况时必须把水蚀和耕作侵蚀模型结合起来, 才会得到较为准确的结果。与水蚀模型和风蚀模型比较, 耕作侵蚀模型更具有普遍性, 因为耕作侵蚀力与气候无关。

4.8 对土壤保持规划和政策的影响

任何防止农业景观土壤流失的措施, 如果不考虑减少耕作侵蚀, 那么这些措施将无法控制耕地景观凸坡位置区的土壤流失。如果这些地带的侵蚀非常严重, 耕作侵蚀就不容忽视, 需要制定一个完善的全面的土壤保持方法。对大部分地区而言, 农业土壤保持政策和项目包括两个主要目标: 一是尽量减少农田内土壤的流失, 二是尽量减少从农田向外输送泥沙。目前, 许多国家的土壤保持项目认为, 风蚀和水蚀引起的土壤以泥沙的形式从田间流失影响了作物的生产力, 所以减少泥沙输送到允许或可接受的水平应当使田间的土壤侵蚀保持在允许侵蚀量范围之内。但是, 耕作侵蚀在景观内发生作用, 严重的耕作侵蚀可以出现在已经达到土壤水蚀或风蚀允许侵蚀量的田块内。

5 结 论

对耕作位移、耕作侵蚀及其重要性的认识必将为耕作研究者提出更多的挑战和机遇。土壤保持战略必须包括耕作侵蚀控制措施,才能具备完整性和综合性。有效的战略并非一定要精深或复杂,即为了实现土壤保持的目的,应当给农民提供更多选择实用的土壤保持措施的余地。采用和保证一种崭新的土壤保持方法需要我们对耕作的许多问题做进一步的研究。面对这些机遇和挑战,耕作侵蚀的研究地位应当与水蚀和风蚀的研究地位同等重要。我们认为,这种认识应当在政府的政策和有关国家项目中得到具体体现。

参考文献:

- [1] Mech, S. J., Free, G. R. Movement of soil during tillage operations[J] . *Aggr. Eng.* 1942, 23: 379~382.
- [2] Khachatryan, Kh. A. Operation of soil-working implements in hilly regions[C] . Russian Translation Series, 37. A. A. Balkema, Rotterdam. 1985. 231.
- [3] Nartov, P. S. Disk soil-working implements[C] . Russian Translation Series, 27. A. A. Balkema, Rotterdam. 1985.
- [4] Kibury's B. Dirvozemio mechanine erozijs[C] . Monograph. Vilnius, Moksas. 1989. 175.
- [5] Yatsukhno, V. Mechanical soil erosion in the conditions of the hill relief of Belarus[D] . Ph. D. Thesis. Agriculture University of Elgava, Elgava, Latvia. 1977. 22.
- [6] Lindstrom, M. J., Nelson, W. W., Schumacher, T. E., et al. Soil movement by tillage as affected by slope[J] . *Soil Till. Res.* 1990, 17: 252~264.
- [7] Lobb, D. A. Soil erosion processes on shoulder slope landscape positions[D] . M. Sc. Thesis. University of Guelph, Guelph. 1991. 390.
- [8] Govers, G., Quine, T. A., Walling, D. E. The effect of water erosion and tillage movement on hillslope profile development: a comparison of field observations and model results[A] . In: Wicherek, S. (ed.). *Farm Land Erosion In Temperate Plains Environment and Hills*[M] . Amsterdam: Elsevier. 1993. 285~300.
- [9] Lindstrom, M. J., Nelson, W. W., Schumacher, T. E. Quantifying tillage erosion rates due to moldboard plowing[J] . *Soil Till. Res.* 1992, 24: 243~255.
- [10] Poesen, J., van Wesemael, B., Govers, G. et al. Patterns of rock fragment cover generated by tillage erosion[M] . *Geomorph.* 1997, 18: 183~197.
- [11] Thapa, B. B., D. K. Cassel, D. P. Garnty. Assessment of tillage erosion rates on steep land Oxisols in the humid tropics using granitic rocks[J] . *Soil Till. Res.* 1992, 51: 233~243.
- [12] Lobb, D. A., Kachanoski, R. G., Miller, M. H. Tillage translocation and tillage erosion in the complex upland landscapes of southwestern Ontario[J] . *Soil Till. Res.* 1999, 51: 189~209.
- [13] Lobb, D. A., Kachanoski, R. G. Modelling tillage erosion on the topographically complex landscapes of southwestern Ontario [J] . *Soil Till. Res.* 1999, 51: 261~277.
- [14] Montgomery, J. A., McCool, D. K., Busacca, A. J., et al. Quantifying tillage translocation and deposition rates due to moldboard plowing in the Palouse region of the Pacific Northwest, USA [J] . *Soil Till Res.* 1999, 51: 175~187.
- [15] van MUYSEN, W., Govers, G., Bergkamp, G., et al. Measurement and modelling of the effects of initial soil conditions and slope gradient on soil translocation by tillage [J] . *Soil Till Res.* 1999, 51: 303~316.
- [16] Lobb, D. A., Kachanoski, R. G., Miller, M. H. Tillage translocation and tillage erosion on shoulder slope landscape positions measured using ^{137}Cs as tracer [J] . *Can. Soil Sci.* 1995, 75: 211~218.
- [17] Quine, T. A., Desmet, P. J. J., Govers, G., et al. A comparison of the roles of tillage and water erosion in landform development and sediment export on agricultural land near Leuven, Belgium [A] . *Variability in Stream Erosion and Sediment Transport* [C] . IAHS Publ. No. 224 1994. 77~86.
- [18] Govers, G., Quine, T. A., Desmet, P. J. J. The relative contribution of soil tillage and overland flow erosion to soil redistribution on agricultural land [J] . *Earth Surface Processes.* 1996, 21: 929~946.
- [19] King, D. J., Cossetto, J. M., Eilers, R. G., Rick, of tillage erosion [A] . In: McRae, T., Smith, S., Gregorich, L. J.

- (eds). Environmental Health of Canadian Agroecosystems. Agriculture and Agri-Food Canada. Ottawa. 200. 77~83.
- [20] Shelton, I. J., Wall, G. J., Cossette, J. M., et al. Risk of water erosion [A]. In: McRae, T., Smith, S., Gregorich, L. J., (eds). Environmental Health of Canadian Agroecosystems. Agriculture and Agri-Food Canada. Ottawa. 200. 59~67.
- [21] Dabney, S. M., Liu, Z., Lane, M., Douglas J. Landscape bending from tillage and erosion between grass hedges [J]. *Soil till. Res.* 1999, 51: 219~231.
- [22] Quin  T. A. Use of caesium-137 data for validation of spatially distributed erosion models: the implications of tillage erosion [J]. *Catena*, 199, 37: 415~430.
- [23] Li, Y., Lindstrom, M. J., Zhang J. H. Spatial variability patterns of soil redistribution and soil quality of steep hillslopes [J]. *Acta Geologica Hispanica*. 2000.
- [24] Lobbs, D. A., Kachanoski, R. G., Modelling tillage translocation using step, liner-plateau and exponential functions [J]. *Soil till res.* 1999 51: 317~330.
- [25] Quin  T. A., Walling, D. E., Chakela, Q. K., et al. Rates and patterns of tillage and water erosion on terraces and contour strips: evidence from caesium-137 measurements [J]. *Catena* 1999, 36: 115~142.
- [26] Schumacher, T. E., Lindstrom, M. J., Schumacher, J. A., Modeling spatial variation in productivity due to tillage and water erosion [J]. *Soil Till Res.* 1999, 51: 331~339.
- [27] Quin  T. A., Walling, D. E., Govers, G. Simulation of radiocaesium redistribution on cultivated hillslopes using a mass balance model: an aid to process interpretation and erosion rate estimation [A]. In: Anderson, M. G., Brooks, S. M., (eds.). Advances in Hillslope Processes [C]. Chichester: John Wiley and Sons Ltd. 1996. 561~588.

TILLAGE TRANSLOCATION AND TILLAGE EROSION PROCESSES AND THEIR IMPLICATIONS FOR AGRO-ECOSYSTEMS

LI Yong¹, ZHANG Jian-hui¹, LOBB D. A.², ZHANG Jian-guo¹

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041 PRC;
2. Department of Soil Science, University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, R3T 2N2, Canada)

Abstract As we begin the 21st century tillage research and practices will take significant new directions. This revolution will be driven by a growing awareness and understanding of the processes of tillage translocation and tillage erosion and of their implications for agricultural sustainability and environmental protection. Tillage translocation is the resultant displacement of soil by tillage. Soil can be moved meters by a single pass of tillage. The translocation of soil by tillage varies greatly within landscapes as a result of several factors; these include the design and operation of tillage implements and the topographic and soil properties of landscapes. The consequence of this variation in translocation is net soil redistribution within landscapes, i.e. tillage erosion. Typically, tillage results in the progressive downslope movement of soil, causing severe soil loss on upper slope positions and accumulation in lower slope positions. Tillage translocation and tillage erosion processes are described. An overview of the research to date is presented. A broad range of agri-environmental implications is examined including: crop productivity and greenhouse gas emission. Challenges and opportunities for tillage researchers are identified.

Key words: tillage translocation; tillage erosion; agroecosystem