

利用 C 射线透射法测量径流含沙量及算法

雷廷武^{1,2}, 赵 军¹, 袁建平³, 王 辉¹, 刘清坤⁴

(1 中科院, 水利部水土保持研究所土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室; 2 中国农业大学水利与土木工程学院; 3 水利部水土保持监测中心; 4 中国农业大学机械工程学院)

摘 要: 首次尝试采用 C 射线透射法测量土壤侵蚀径流中的含沙量。用两种不同土壤(黄绵土、粘土)、三种含沙量增量(3%、5%、10%)和三种测量时间(6 s、10 s、20 s)进行了含沙量测量实验,以验证用 C 射线测量泥沙含量的可行性、确定泥沙含量对 C 射线的响应特性。并推导了根据 C 射线透射强度计算含沙量的理论计算公式。将实验结果与理论计算值进行对比,以检验理论计算的准确性和测量实验与理论计算的一致性。结果表明,C 射线透射通过泥沙溶液的强度与水流含沙量间有极度显著的线性相关关系,并与理论计算结果高度一致,表明可由 C 射线透射强度稳定、可靠、准确地确定含沙量值。

关键词: 含沙量测定; C 射线透射法; 径流; 透射强度; 测量时间

中图分类号: 157.1 文献标识码: A 文章编号: 100226819(2002)0120018204

径流含沙量是土壤侵蚀、水土保持、水文研究、河流泥沙检测的重要内容。含沙量的现场快速、实时准确测量是目前亟待解决的问题。传统的含沙量测量方法是人工采集泥沙样品,然后烘干、称重,该方法无法实现实时、在线测量泥沙含量的连续变化过程,且费工费时。多年来科技人员一直在积极探求含沙量的现代测量方法,如电导法、电容法、振动法、光电法、超声法和激光法等^[1]。由于受传感器件和电子元件灵敏度的限制,这些方法的测量精度都很低,受现场客观因素的影响较大,需要在现场进行较繁琐的调校,而且仪器的稳定性能极差,现场测量径流含沙量的变化范围很窄。由于这些问题,至今仍无一种好的径流泥沙含量测量方法。

C 射线衰减法在土壤含水量的测量中得到了广泛应用,但到目前为止,尚未见任何有关用 C 射线测量径流泥沙含量的报道。

本研究的目的是,尝试用 C 射线测量水流泥沙含量的可行性;从理论上推求采用 C 射线透射强度计算含沙量的计算公式;通过实验测定,研究理论计算公式的准确性;研究采用 C 射线测量泥沙含量的可行性、测量结果的准确性及其与理论计算结果的一致性。为测量仪器的进一步开发提供基础。

1 C 射线测量含沙量的原理及算法^[2~3]

C 射线是一种高频高能电磁波,能穿透物体。当一束 C 射线穿过物质后,其能量强度由于物质吸收被减弱。减弱程度与放射源能量、吸收体性质和物质厚度有关,并服从指数函数关系,用下式表示

$$I = I_0 e^{-\mu L} \quad (1)$$

式中 I_0, I ——C 射线束穿过物质前、后的射线强度, nös; L ——被 C 射线透射的物质厚度, cm; μ ——被透射的物质对 C 射线的吸收系数, $1/\text{cm}$, $\mu = \mu_m Q$ μ_m ——被透射物质的质量吸收系数, $\text{cm}^2/\text{ög}$; Q ——被透射物质的密度, $\text{g}/\text{öcm}^3$ 。

含沙水流为液、固两相介质的混合物,当 C 射线穿透水沙混合物时,由于水沙的作用,其减弱规律服从下列表达式

$$I = I_0 e^{-(L_{mw} Q_w + L_{ms} Q_s)L} \quad (2)$$

式中 L_{mw}, L_{ms} ——为水和泥沙的质量吸收系数, $\text{cm}^2/\text{ög}$; Q_w, Q_s ——单位体积的质量含水量和单位体积的干土质量, $\text{g}/\text{öcm}^3$ 。

设 $t_1(s)$ 时刻单位体积干土质量为 Q_{1t} 、单位体积含水量为 Q_{1w} , 则 t_1 时刻 C 射线穿过厚为 L 的混合物后射线强度为

$$I_1 = I_0 e^{-(L_{mw} Q_{1w} + L_{ms} Q_{1t})L} \quad (3)$$

由于在动态测量过程中,水流的单位体积含水量和单位体积泥沙质量均随时间发生着变化,令 t_2 时刻单位体积干土质量为 Q_{2t} 、单位体积含水量为 Q_{2w} 则有

$$I_2 = I_0 e^{-(L_{mw} Q_{2w} + L_{ms} Q_{2t})L} \quad (4)$$

以上两式相除得出

收稿日期: 2001207209 修订日期: 2001212204
基金项目: 中国科学院“百人计划”项目和中以合作项目 99w 2002 1422 共同资助
作者简介: 雷廷武, 博士, 研究员, 中国农业大学教授, 陕西杨凌中科院, 水利部水土保持研究所土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 712100

$$\frac{I_2}{I_1} = e^{L_{ms}(Q_1 - Q_2)L} \times e^{L_{mw}(Q_1 - Q_2)L} \quad (5)$$

$Q_1 - Q_2$ ($g\ddot{o}cm^3$) 即为容积含沙量增量, $Q_1 - Q_2$ 为容积含水量增量。二者间的关系可解析如下, 由于量值为 $Q_1 - Q_2$ 的容积含沙量增加(减少)量引起了量值为 $Q_1 - Q_2$ 的容积含水量减少(增加)量, 总的单位体积不变, 即泥沙增加(或减少)的体积 ($\$V_s$) 等于水量减少(或增加)的体积 ($-\V_w), 即

$$\$V_s = \frac{(Q_1 - Q_2) \times 1}{2.65} = -\$V_w = \frac{(Q_1 - Q_2) \times 1}{1}$$

式中 $2.65 g\ddot{o}cm^3$ 为泥沙颗粒的密度, 因此有

$$Q_1 - Q_2 = - (Q_1 - Q_2) \times 2.65 \quad (6)$$

将(6)式代入(5)并两边取对数式得

$$Q_2 - Q_1 = \left[\frac{\ln I_1 - \ln I_2}{L_{ms} - \frac{L_{mw}}{2.65}} \right] L \quad (7)$$

将上式 Q_1, Q_2 分别以 C_1, C_2 表示, 则有

$$C_2 = C_1 + \left[\frac{\ln I_1 - \ln I_2}{L_{ms} - \frac{L_{mw}}{2.65}} \right] L \quad (8)$$

泥沙质量吸收系数 L_{ms} 的获取方法为: 测定容器内一定厚度 (L_c) 的清水的 C 射线透射强度 (I_{00}), 其对应的含沙量为 0%; 测量干土的 C 射线透射强度 (I_{100}), 其相应含沙量应为 100%, 依据(8)式即可得出泥沙质量吸收系数

$$L_{ms} - \frac{L_{mw}}{2.65} = \frac{\ln I_{00} - \ln I_{100}}{L_c} \quad (9)$$

$$L_{ms} = \frac{\ln I_{00} - \ln I_{100}}{L_c} + \frac{L_{mw}}{2.65} \quad (10)$$

将(10)式代入(8)式得

$$C_2 = C_1 + \frac{\ln I_1 - \ln I_2}{\frac{\ln I_{00} - \ln I_{100}}{L_c} \times L} \quad (11)$$

令: $L_{ms0} = \ln(I_{00}\ddot{o}I_{100})\ddot{o}L_c$, 得

$$C_2 = C_1 + \frac{\ln I_1 - \ln I_2}{L_{ms0} \times L} \quad (12)$$

由以上公式可以看出: 若已知初始射线强度为 I_1 , 初始泥沙含量为 C_1 , 测量泥沙质量吸收系数为 L_{ms0} , 吸收物质厚度为 L , 结束时刻射线强度为 I_2 , 则可由上式得出泥沙含量变化 C_2 。

当测定 L_{ms} 时的物质厚度 L_c 等于实验时的物质厚度 L , 即 $L_c = L$ 时, 则有

$$C_2 = C_1 + \frac{\ln I_1 - \ln I_2}{\ln I_{00} - \ln I_{100}} \quad (13)$$

依据上式可非常容易地得出相对初始状态的泥沙含量增量值。

2 实验材料与方法

为了验证用 C 射线测量水流含沙量的可行性, C

射线测量泥沙含量的反应特性, 用上述理论计算公式计算泥沙含量的准确性, C 射线测得的泥沙含量与用理论计算方法求得的泥沙含量的一致性, 设计了一系列实验。

2.1 实验材料

实验所用的 C 射线系统, 采用 10 毫居的 ^{137}Cs 作放射源, 用能谱探头探测(穿透被测物体的)射线强度, 用定标器对测量得到的射线信号进行标定。用直径为 12 cm 容量为 1 000 mL 的量杯, 配制不同含沙量的标准泥沙溶液, 作为被测物体。实验采用两种土壤: 黄绵土和埭土, 以期检验 C 射线对不同土壤的反应特性。供试土壤的粒径分布如表 1。

表 1 供试土壤的粒径分布

Table 1 Soil particle sizes and its composition

		1~0.25	0.25~0.05	0.05~0.01	0.01~0.005	0.005~0.001	<0.001	<0.01
黄绵土	颗粒级别	0.25	0.05	0.01	0.005	0.001	<0.001	<0.01
	含量 \ddot{o} %	0.001	14.20	59.89	9.45	2.66	13.8	25.9
埭土	颗粒级别	1~0.25	0.25~0.05	0.05~0.01	0.01~0.005	0.005~0.001	<0.001	<0.01
	含量 \ddot{o} %	0.4	4.5	44.7	10.7	20.6	19.1	50.4

2.2 实验方法

采用 1\ddot{o}1000 的电子天平, 称取三组烘干过筛的黄绵土和埭土, 逐步加水搅拌至 1 000 mL, 将其配制成泥沙溶液, 形成 3%、6%、9%、12%81% 及 5%、10%、15%、20%80% 和 10%、20%、30%、40%80% 的标准浓度泥沙溶液, 加少量悬浮剂充分搅拌均匀以防止泥沙过快沉淀。将泥沙样品放在 C 射线源与探头正中位置上, 采用 20 s、10 s 和 6 s 的采样时间, 采集定标器上的透射射线强度。每次测量重复 3 次, 为消除随机误差, 采用同一样品的三次透射射线强度平均值推算含沙量值。实验共测量 306 次。

3 实验结果与分析

经对 C 射线强度实验数据与对应的标准含沙量的对应关系(详细数据未列出)进行分析整理, 得到在不同泥沙含量下 C 射线透射强度与含沙量变化量之间的回归方程, 结果汇总如表 2。

由表 2 可以看出, 不管采样时间是 6 s 还是 10 s、20 s, 也不论含沙量是以 3%、5% 还是 10% 的量在变化, 含沙量透射强度值与含沙量变化量之间均存在很好的线性相关性, 相关系数 r 普遍在 0.98 以上, 且其系数 a 和 b 变化很小, 其中 a 变化于 - 0.0232~ - 0.0259 之间, 变化幅度为 - 0.0027; b 在 234.86~ 260.28 之间变化, 变化幅度为 25.42。

表 2 含沙量变化量和采样时间对黄绵土和垆土径流泥沙测量结果的影响

Table 2 Influence of sediment concentration increment and sampling time on the measured results of silt loess and clay loess

土壤类型	采样时间 \bar{t}_s	拟合方程 ($y = ax + b$)
黄绵土	6	$a = -0.0258, b = 260.28, r = -0.992$
	10	$a = -0.0259, b = 260.23, r = -0.990$
	20	$a = -0.0255, b = 256.71, r = -0.991$
垆土	6	$a = -0.0228, b = 234.86, r = -0.980$
	10	$a = -0.0230, b = 237.21, r = -0.985$
	20	$a = -0.0232, b = 239.37, r = -0.987$

注: r 为相关系数; x 为 C 射线平均透射强度值; y 为含沙量变化量。

为了检验 C 射线测量的含沙量对土壤种类的依赖性, 必须对表 2 所列的回归参数 \bar{b} 回归方程进行检验, 如果回归参数 (a, b) 或各回归方程是一致的, 则 C 射线的测量结果不依赖于土壤, 即由一种土壤得

到的标定公式可以用于另一种土壤产生的泥沙含量的测定。为此, 将表 2 所用的回归模型

$$y = ax + b \quad (14)$$

作如下变换

$$Y = y - b = ax \quad (15)$$

将对回归方程的检验转换为对回归参数 a 的检验。即用 (15) 式对试验数据进行回归分析后, 检验回归得到的各工况下的 a 值的一致性。为此, 取定表 2 中黄绵土回归系数均值 \bar{b}_s 和表 2 中垆土的回归系数的均值 \bar{b}_c 分别替代 (15) 式中的 b 对所有试验数据用下列公式进行变换后再进行回归分析。

$$Y = y - \bar{b}_s = ax \quad (16)$$

$$Y = y - \bar{b}_c = ax \quad (17)$$

式中 下标 c 表示垆土, 下标 s 表示黄绵土。分别用黄绵土和垆土的试验数据由 (16) 和 (17) 式进行回归分析, 所得结果列入表 3。

表 3 土壤类型对 C 射线测量含沙量影响的检验

Table 3 Influence of soil types on gamma γ measured sediment concentration

土壤类型	采样时间 \bar{t}_s	回归模型: $Y = y - \bar{b}_s = ax$			回归模型: $Y = y - \bar{b}_c = ax$		
		a	R^2	R	a	R^2	R
黄绵土	6	-0.02565	0.992	0.000034	-0.02308	0.981	0.000053
	10	-0.02574	0.990	0.000039	-0.02316	0.979	0.000057
	20	-0.02575	0.991	0.000037	-0.02317	0.983	0.000051
垆土	6	-0.02564	0.964	0.000073	-0.02307	0.980	0.000054
	10	-0.02559	0.972	0.000064	-0.02303	0.984	0.000048
	20	-0.02545	0.977	0.000059	-0.02291	0.986	0.000045

由表 3 可见, 所有各工况的确定性系数 R^2 均很高, 为 0.97 以上, 表明泥沙含量和 C 读数间具有良好的线性相关关系。用黄绵土的试验数据采用表 2 中黄绵土的回归参数 b 的均值 \bar{b}_s 进行变换后, 回归所得的不同采样时间的泥沙含量参数 a 间的最大相对误差为 0.4%, 即测量得到的数据的误差为 0.4%。将垆土的试验数据用表 2 中所列黄绵土的回归参数 b 的均值 \bar{b}_s 进行变换以后, 回归所得垆土泥沙含量的参数 a 与黄绵土的回归参数 a 间的最大相对误差为 1.2%, 即当用黄绵土的标定公式进行由垆土产生的泥沙含量的测定时, 最大相对误差为 1.2%。同样, 用垆土的试验数据采用表 2 垆土的回归参数 b 的均值 \bar{b}_c 进行变换后, 回归所得的不同采样时间的泥沙含量参数 a 间的最大相对误差为 0.7%, 即测量得到的数据的误差为 0.7%。当黄绵土的试验数据用表 2 中所列垆土的回归参数 \bar{b}_c 进行变换以后, 回归所得的泥沙含量参数 a 与垆土泥沙含量的

回归参数 a 间的最大相对误差为 1.1%, 即当用垆土的标定公式进行由黄绵土产生的泥沙含量的测定时, 最大相对误差为 1.1%。由此分析可知, 对于试验所用的两种土壤, 用其中任何一种所得到的测量标定公式, 均可用于另一种土壤所产生的泥沙含量的测定, 其测量的最大相对误差为 1.2%。

这样的结果不仅表明利用 C 射线透射法测量泥沙含量是可行的, 而且所测量出的径流含沙量值基本不随土壤类型、含沙量变化量大小和采样时间长短的变化而改变。表明 C 射线对水流中的泥沙含量具有良好的反应特性, 并且测量结果具有较好的稳定性。鉴于此, 尝试采用一个通用的简单方程来表达不同土壤条件下 (包括不同采样时间、泥沙含量改变量) 的含沙量与 C 射线透射强度值间的关系, 经对所有实验数据进行分析, 得出通用方程式如下

$$y = -0.0234x + 240.59 \quad (18)$$

该回归方程的确定性系数 $R^2 = 0.999$ 。将理论

计算结果与测量结果进行了对比分析。

结果表明, 无论是对于黄绵土还是埧土, 用理论计算的结果与标准浓度十分接近, 表现在: 相关系数都大于 0.99, 回归系数接近于 1, 表明一一对应。实际测量的结果与标准含沙量之间也具有类似的结果, 相关系数均大于 0.99, 回归系数接近于 1。从而说明了理论计算表达式及测量方法的正确性。在该系列实验(时间)范围内, 测量结果与时间无关。同时, 回归结果还表明: 黄绵土的理论计算结果及测量结果与标准泥沙含量间的误差分别为 3.5% 及 0.5%; 埧土的理论计算结果及测量结果与标准泥沙含量间的误差分别为 6.2% 及 0.8%。理论计算结果比实际大, 而测量结果较实际值略为偏小。理论计算结果比测量结果的误差偏大一些。

将观测结果与理论计算结果进行比较, 如图 1 所示。结果表明, 对于黄绵土和埧土, 理论计算结果与测量结果具有很好的相关性, 相关系数分别达到 0.999 和 0.997, 具有很好的一致性, 回归系数分别达到 0.979 和 0.931, 即基本上具有一一对应的关系。黄绵土及粘土的理论计算结果与测量结果间的误差分别为 2.1% 及 6.9%。

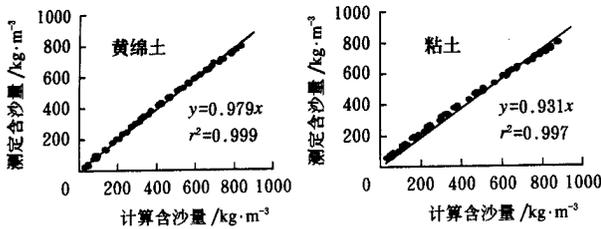


图 1 黄绵土、粘土的理论计算与测量结果比较
Fig. 1 Comparison of measured sediment with the theoretically computed values for silt and clay

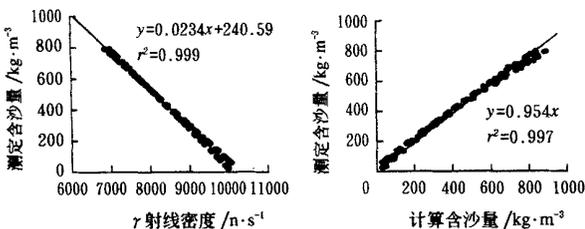


图 2 含沙量计算值与测量值之比较
Fig. 2 Comparison of the computed sediment concentration with the measured values

为检验该方法对于不同土壤的总体响应, 将由测得的 C 射线透射强度和用方程(18) 计算得到含沙量值(测量值)之间的关系示于图 2a。对于来自两种土壤的数据, 回归结果显示了极其显著的相关关系, 相关系数达 0.999。将实测与由实测的 C 射线透射强度值采用方程(13) 计算得出含沙量值(计算值)进行了对比, 结果列入图 2b。

由上图 2b 中的回归表达式可以看出: 1) 两者的相关系数很高(0.997), 表明两者间具有良好的相关关系; 2) 两者间回归方程的回归系数非常接近于 1 (0.954), 表明两者间几乎是一一对应的, 即可以由测量值代替理论计算值, 反之亦然。因此, 表明测量方法基本上与土壤的类型无关。并且, 可用上列回归(18) 式代替理论计算公式(13) 式, 从而可以简化计算。

4 结 论

推求出了 C 射线透射法确定泥沙含量的理论计算公式。通过系统的实验, 研究了 C 射线透射法测量含沙量时测量的 C 射线强度对采样时间、土壤类型、泥沙含量增量变化的反应特性, 结果表明该方法具有普遍适用性。用实际测得的数据验证了测量方法的可行性, 给出了(该特定测量系统)适用于不同采样时间、土壤、泥沙含量变化的简单普适模型。验证了理论计算的正确性和理论计算与实际测量的一致性。检验得知, 就实验的 2 种土壤而言, 测量方法与土壤类型无关, 正如理论计算公式所表示的那样。测量结果准确可靠。采样时间可通过缩短 C 射线源与能谱探头间的距离进一步缩短, 从而使得测量时间更短并兼顾结果准确、稳定可靠, 是目前现场快捷、简便、准确可靠的非扰动含沙量测量的好方法。该实验测量结果的相对标准泥沙含量的误差小于 1%, 误差主要产生于标准泥沙溶液的配制、射线脉冲的随机性、仪器的稳定性等。

[参 考 文 献]

- [1] 方彦军, 张红梅, 程 瑛. 含沙量测量的新进展[J]. 武汉水利电力大学学报, 1999, 32(3): 55~ 57.
- [2] 汪志荣. C 透射法测量土壤含水量[A]. 动力水文实验研究[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1991. 89~ 97.
- [3] 王文焰, 张建丰, 汪志荣. C 透射法在土壤水动态研究中的精度控制[A]. 见: 王文焰主编. 动力水文实验研究[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1991. 98~ 105.

LA I and the red edge parameter. Then, the red edge was proved to be valuable for assessment of rice upper leaves chlorophyll contents. But a correlation was not found between chlorophyll content of leaves or carotenoid and the wavelength of the red parameters. Some red edge parameters are one of the best remote sensing descriptors. The feasibility of using derivative spectra to measure some agronomic parameters is verified.

Key words: derivative spectrum; rice; agronomic parameter; red edge parameters

Numerical Simulation for Collision on Safe Cab of Farm-Forestry Vehicles (14)

Chen Long, Wang Jinwen, Zhou Kongkang (*Jingjiang College, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China*)

Abstract: The model of collision on safe cab of farm-forestry vehicles has multi-nonlinear features on geometry and material. The large-scale deformation elastic and plastic and plastic theories are applied by setting up the mathematical model for cab, the strength feature of it is analysed. The relation of force and deformation when vehicle rolled is predicted. The safety of driver's space ingressed by deformation of components of the cab is estimated, and the deformation failure is assessed. The numerical simulation for collision on safe cab of vehicle is realized. Based on a type of farm-forestry vehicle, simulations based on theory and experiment are conducted. Both results are basically coincident. This simulation model is practical and feasible, which can provide reference for safety design of vehicle cab.

Key words: vehicle; safety; cab; numerical simulation

Determining Sediment Concentration in Runoff Flow with C Ray Attenuation and the Related Theoretical Algorithm (18)

Lei Tingwu^{1,2}, Zhao Jun¹, Yuan Jianping³, Wang Hui¹, Liu Qingkun⁴ (*1. Institute of Soil and Water Conservation, CAS and MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 Faculty of Irrigation and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 3 Soil and Water Conservation Monitoring Center, Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China; 4 School of Machinery Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China*)

Abstract: An attempt was made to use gamma ray transmission method to measure sediment concentration in runoff. Two types of soils (silt loess and clay loess), three increments of sediment concentration (3%, 5% and 10%) and 3 sampling periods (6 s, 10 s, 20 s) were adopted for sediment measuring experiments, so as to validate the feasibilities of measuring sediment concentration with gamma ray method and to determine the response of measured sediment concentration to different conditions. The theoretical algorithm was derived for determining sediment concentration with gamma ray method. A simple relation of sediment concentration with gamma ray readings was statistically given. Experimental data were used to verify the correctness of the theoretical equation and to check the consistency of the theoretical results with those from experiments. Results showed very good linear relationship between sediment concentrations and gamma ray readings, as well as very good consistency between measured sediment concentrations and the theoretically computed values. The gamma ray method can be used to determine sediment concentrations steadily, reliably and precisely.

Key words: sediment concentration measurement; penetration method by gamma ray; runoff; penetration intensity; sampling period

Characteristics of Aquasorb and Its Application in Crop Production (22)

Huang Zhanbin¹, Zhang Guozhen², Li Yangyang¹, Hao Mingde¹, Meni Ben-Hur³, Deli Chen⁴ (*1. The State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS, Northwest SciTech University of Agriculture and Forestry, Yangling Shaanxi 712100, China; 2 Northwest SciTech University of Agriculture and Forestry, Yangling Shaanxi 712100, China; 3 Institute of Soil, Water and Environmental Sciences, Agricultural Research Organization, Bet Dadan 50250 Israel; 4 Institute of Land and Food Resource, The University of Melbourne, Victoria 3010 Australia*)

Abstract: Aquasorb is a kind of sodium polymer with characteristic of absorbing and storing water. There are many types and varieties in commercial market. The purpose of this study is to determine the chemical features of sodium polymer and its effect on soil improving, and to analyze the influence on crop yield and fertilizer use efficiency in farming field. The result showed that $[Na^+]$ and electronic conductivity (EC)